

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЗПО «ДПТК»

Олександр СТРИЛЕЦЬ

« 28 » серпня 2026 р.

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора ІМР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНКО

« 28 » серпня 2026 р. я

Конспект лекцій

з дисципліни ОК8 «ХІМІЯ»

Освітньо-професійна програма «Зварювальне виробництво»

Спеціальність G9 «Прикладна механіка»

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНОХІМІЧНИЙ БЛОК · ТЕМИ 1–8

Тема 1. Основні поняття, закони та кількісні співвідношення в хімії	3
Тема 2. Будова речовини: атом, періодичний закон та хімічний зв'язок	14
Тема 3. Основні класи неорганічних сполук та закономірності хімічних перетворень	22
Тема 4. Розчини та способи вираження їх складу	31
Тема 5. Електроліти, кислотно-основні процеси та рН технологічних середовищ	40
Тема 6. Енергетика, швидкість та рівновага хімічних процесів	49
Тема 7. Окисно-відновні процеси та хімічні властивості металів	58
Тема 8. Основи електрохімії. Корозія металів та способи захисту	67

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ БЛОК · ТЕМИ 9–27

Тема 9. Хімічні властивості металів у зварювальному виробництві	76
Тема 10. Сталі та чавуни: хімічний склад і вплив легувальних елементів	84
Тема 11. Кольорові метали та їх сплави у зварювальному виробництві	93
Тема 12. Енергетика та високотемпературні хімічні процеси під час зварювання	100
Тема 13. Окисно-відновні процеси у зварювальній зоні та зварювальній ванні	107
Тема 14. Взаємодія розплавленого металу з киснем, азотом і воднем	113
Тема 15. Формування хімічного складу металу зварного шва	120
Тема 16. Захисні гази та газові суміші у зварюванні	127
Тема 17. Горючі гази та хімія процесів газового зварювання і різання	134
Тема 18. Електродні матеріали та покриття електродів: склад і функції компонентів	140
Тема 19. Зварювальні флюси та шлаки: склад, властивості та хімічні процеси	146
Тема 20. Зварювальний і порошковий дріт: хімічний склад, легування та розкиснення	153
Тема 21. Основи хімічної металургії зварювання: розкиснення, легування та очищення металу шва	159
Тема 22. Хімічні причини утворення пор, неметалевих включень та інших дефектів зварного металу	164
Тема 23. Корозія зварних з'єднань і хімічна неоднорідність металу	170
Тема 24. Хімічна підготовка поверхонь перед зварюванням: очищення, знежирення та видалення оксидів	175
Тема 25. Протикорозійний захист зварних конструкцій і захисні покриття	180
Тема 26. Зварювальні аерозолі та газоподібні продукти зварювальних процесів	185
Тема 27. Хімічна безпека та екологічні аспекти зварювального виробництва	192

ТЕМА 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ЗАКОНИ ТА КІЛЬКІСНІ СПІВВІДНОШЕННЯ В ХІМІЇ

Мета лекції. Повторити фундаментальні хімічні поняття, навчитися користуватися кількістю речовини, молярною масою, законами хімії та співвідношеннями за рівняннями реакцій.

План лекції

1. Хімія як наука. Речовина, атом, молекула, хімічний елемент.
2. Хімічні формули та кількісні характеристики речовин.
3. Основні закони хімії та стехіометричні співвідношення.
4. Газові закони та об'ємні співвідношення.
5. Розрахунки за хімічними рівняннями. Агрегатні стани речовини.

1. Предмет хімії та поняття речовини

Хімія вивчає склад, будову і властивості речовин, а також процеси їх перетворення. Під час хімічної реакції одні речовини перетворюються на інші; склад вихідних речовин та продуктів встановлюють за допомогою хімічних формул. Кількісні співвідношення між реагентами і продуктами визначають із законів хімії та рівнянь реакцій.

Речовина є формою існування матерії, яка характеризується певним складом і фізичними та хімічними властивостями за відповідних умов. Властивості чистої речовини відрізняються від властивостей суміші. Чисті речовини мають визначений склад; суміші утворені двома або більшою кількістю речовин, співвідношення яких може змінюватися.

Фізичні явища не змінюють хімічної природи речовини: наприклад, плавлення льоду або випаровування води. Хімічні явища супроводжуються зміною складу чи будови речовин; їх описують рівняннями реакцій. У подальших темах ці поняття потрібні для розуміння окиснення металу, роботи розчинів, електрохімічних і високотемпературних процесів.

Основою пояснення хімічних явищ є атомно-молекулярне вчення. Згідно з ним речовини утворені частинками, між якими діють сили притягання і відштовхування. Частинки перебувають у безперервному русі, а властивості речовини пов'язані як з природою цих частинок, так і з їхньою взаємодією та просторовим розміщенням. У процесі хімічного перетворення змінюються зв'язки між атомами, проте атоми хімічних елементів зберігаються. Саме це дає підставу складати рівняння реакцій і перевіряти правильність коефіцієнтів.

Вивчення загальної хімії об'єднує декілька взаємопов'язаних напрямів: будову речовин; закономірності зміни властивостей елементів; теплові ефекти і напрямки хімічних реакцій; швидкість і механізми хімічних перетворень. Ці питання не існують ізольовано. Наприклад, знаючи склад сполуки та її хімічні властивості, можна передбачити, з якими

реагентами вона взаємодіятиме. Знання кількісного складу дозволяє визначати, скільки вихідних речовин необхідно для одержання заданої маси продукту.

Хімічні властивості виявляються під час перетворень речовини: здатності окиснюватися, відновлюватися, реагувати з кислотами, основами та іншими речовинами. Фізичні характеристики — температура плавлення, густина, колір, агрегатний стан — спостерігаються без зміни хімічної природи речовини. У технічній практиці обидві групи властивостей важливі. Так, метал перед початком зварювання має певний хімічний склад і певну температуру плавлення; нагрівання може змінити його агрегатний стан, а реакція з киснем — хімічний склад поверхневого шару.

Матеріал цього розділу: [1, с. 7–9]. [4, розд. 1]

2. Атоми, молекули, йони і хімічні елементи

Атом — електронейтральна частинка, що складається з позитивно зарядженого ядра та електронів. Атом є носієм хімічних властивостей певного елемента. Хімічний елемент — вид атомів з однаковим зарядом ядра. Коли атом віддає або приєднує електрони, він перетворюється на заряджену частинку — йон. Позитивно заряджені йони називають катіонами, негативно заряджені — аніонами.

Молекула — найменша частинка речовини молекулярної будови, що зберігає її хімічні властивості. Молекули складаються з атомів, сполучених хімічними зв'язками. Водночас не всі речовини мають молекулярну будову: метали, багато солей та речовини з атомними кристалічними ґратками мають іншу організацію частинок. У хімічному рівнянні необхідно розрізняти атом, молекулу та йон.

Якщо речовина утворена атомами одного хімічного елемента, її називають простою. Прості речовини можуть мати різні структурні форми: кисень O_2 та озон O_3 є різними простими речовинами Оксигену. Речовину з атомів різних елементів називають складною, або хімічною сполукою: H_2O , CO_2 , $NaCl$.

Таблиця 1.1. Основні хімічні поняття

Поняття	Зміст	Приклад
Атом	Електронейтральна частинка хімічного елемента	Fe, O, H
Молекула	Група атомів, сполучених хімічними зв'язками	H_2O , O_2
Йон	Електрично заряджена частинка	Na^+ , SO_4^{2-}
Проста речовина	Утворена атомами одного елемента	Fe, O_2
Складна речовина	Утворена атомами різних елементів	H_2O , $NaCl$

Хімічні символи — скорочені міжнародні позначення елементів. Індеси в формулах показують кількість атомів даного елемента у формульній одиниці, а коефіцієнти перед формулами в рівняннях — кількісні співвідношення між речовинами. Не можна замінювати коефіцієнт зміною індексу: така зміна означала б іншу речовину.

Поняття «хімічний елемент» і «проста речовина» не тотожні. Елемент позначає певний вид атомів; проста речовина — утворення з атомів цього елемента в конкретній формі існування. Наприклад, атоми Карбону можуть утворювати графіт і алмаз: елемент однаковий, але фізичні властивості простих речовин різні. Те саме стосується кисню та озону, молекули яких містять різне число атомів Оксигену.

Під час розгляду формул важливо відрізнити частинки, що існують окремо, від формульних одиниць. Молекула H_2O містить два атоми Гідрогену й один атом Оксигену. Формула NaCl відображає найпростіше кількісне співвідношення йонів Натрію та Хлору в кристалічній солі, а не окрему молекулу такої будови. Для металів хімічний символ зазвичай позначає елемент і просту речовину: Fe — Ферум як елемент і залізо як метал.

Хімічні символи поєднують у формулах у певному порядку. За формулою можна з'ясувати якісний склад — перелік елементів — і кількісний склад — співвідношення їх атомів. Запис $2\text{H}_2\text{O}$ означає дві молекули води, а не одну молекулу H_4O_2 . Коефіцієнт стосується формули загалом, тому помножує кількість кожного виду атомів. Розуміння цієї відмінності потрібне для запису матеріального балансу реакції та для подальших кількісних розрахунків.

Визначення і поділ речовин подано за: [1, с. 8–10].

3. Хімічна формула та відносні маси

Хімічна формула відображає якісний і кількісний склад речовини за допомогою символів елементів та числових індексів. Відповідно до формули визначають, які елементи входять до складу сполуки і скільки атомів кожного з них припадає на формульну одиницю. Для обчислення маси використовують відносні атомні маси елементів, наведені в періодичній системі.

Абсолютні маси атомів дуже малі, тому в хімії застосовують атомну одиницю маси, визначену через одну дванадцяту маси атома Карбону-12. Відносна атомна маса A_r показує, у скільки разів маса атома перевищує цю одиницю; вона не має розмірності. Відносна молекулярна маса M_r є сумою відносних атомних мас атомів, які входять до складу молекули.

$$M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2A_r(\text{H}) + A_r(\text{O}) \approx 2 \cdot 1 + 16 = 18 \quad (1.1)$$

$$M_r(\text{CaCO}_3) = A_r(\text{Ca}) + A_r(\text{C}) + 3A_r(\text{O}) \approx 40 + 12 + 3 \cdot 16 = 100 \quad (1.2)$$

При записі розрахунку необхідно враховувати індекс біля кожного елемента, а якщо є дужки — множити кількість усіх атомів у дужках на індекс за ними. Наприклад, формула $\text{Ca}(\text{OH})_2$ містить один атом Кальцію, два атоми Оксигену та два атоми Гідрогену.

Масова частка елемента в речовині

За формулою сполуки можна визначити масову частку кожного хімічного елемента. Вона дорівнює відношенню маси атомів цього елемента у формульній одиниці до відносної молекулярної маси всієї сполуки. Сума масових часток усіх елементів у чистій сполуці дорівнює одиниці, або 100 %.

$$w(E) = n \cdot A_r(E) / M_r(\text{сполуки}) \quad (1.3)$$

$$w(E), \% = w(E) \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

Для води H_2O масова частка Гідрогену становить приблизно $2/18 = 0,111$, або 11,1 %, а масова частка Оксигену — $16/18 = 0,889$, або 88,9 %. Обидва значення разом дають 100 %. Цей підхід застосовують до будь-якої речовини зі сталою хімічною формулою.

Читання формул із дужками

У складних формулах числовий індекс за дужками вказує, скільки разів повторюється група атомів. Наприклад, у $Ca(OH)_2$ дві гідроксильні групи, тому в розрахунку молярної маси враховують один атом Кальцію, два атоми Оксигену і два атоми Гідрогену. Для $Al_2(SO_4)_3$ в одній формульній одиниці містяться два атоми Алюмінію, три атоми Сульфуру і дванадцять атомів Оксигену. Неуважне розкриття дужок є поширеною причиною помилок у визначенні відносних молекулярних мас.

$$M_r[Ca(OH)_2] = 40 + 2(16 + 1) \approx 74 \quad (1.5)$$

$$M_r[Al_2(SO_4)_3] = 2 \cdot 27 + 3(32 + 4 \cdot 16) \approx 342 \quad (1.6)$$

Розрахунок масової частки здійснюють у тій самій послідовності: спочатку знаходять відносну молекулярну або формульну масу, потім визначають внесок атомів обраного елемента. Наприклад, на Оксиген у $CaCO_3$ припадає $3 \cdot 16 = 48$ відносних одиниць маси за загальної маси 100. Його частка становить 48 %. Знання масової частки дозволяє перейти від маси сполуки до маси окремого елемента, а також виконати зворотний розрахунок.

З формули речовини можна визначити відношення мас елементів навіть тоді, коли загальна маса зразка невідома. Якщо маси компонентів у формульній одиниці відомі, їх відношення залишається сталим для будь-якої кількості чистої сполуки. Ця обставина є кількісним проявом закону сталості складу, який буде розглянуто далі. Усі значення відносних атомних мас при розрахунках потрібно брати з однієї прийнятої таблиці або з округлень, установлених умовою навчальної задачі.

Відносні маси та формульні співвідношення: [1, с. 10–11]; [2, с. 9–11]. [5, розд. про кількісні закони]

4. Кількість речовини та молярна маса

Кількість речовини позначають n ; її одиниця СІ — моль. Один моль містить визначену кількість структурних одиниць: атомів, молекул, йонів або інших частинок, які потрібно

зазначати у формулюванні. Стала Авогадро становить приблизно $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Це співвідношення дає змогу переходити від макроскопічної маси речовини до числа її частинок.

$$N = n \cdot N_a \quad (1.7)$$

$$n = N / N_a \quad (1.8)$$

$$N_a \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \quad (1.9)$$

Молярна маса M — маса одного моля речовини. У звичайних хімічних задачах її виражають у грамах на моль. Числове значення молярної маси в г/моль збігається з відносною молекулярною (або формульною) масою. Молярну масу не слід плутати з масою однієї молекули: перша стосується одного моля речовини, друга — однієї структурної одиниці.

$$n = m / M \quad (1.10)$$

$$m = n \cdot M \quad (1.11)$$

$$M = m / n \quad (1.12)$$

Наприклад, молярна маса води становить приблизно 18 г/моль. Зразок води масою 36 г містить 2 моль молекул H_2O . Для обчислення числа молекул у цьому зразку множать 2 моль на сталу Авогадро; отримують приблизно $1,204 \cdot 10^{24}$ молекул. Маса однієї молекули води дорівнює відношенню 18 г/моль до N_a .

Зв'язок основних величин

Величина	Позначення	Одиниця	Основне співвідношення
Маса речовини	m	г	$m = n \cdot M$
Кількість речовини	n	моль	$n = m / M$
Молярна маса	M	г/моль	$M = m / n$
Число частинок	N	безрозмірне	$N = n \cdot N_a$
Стала Авогадро	N_a	моль ⁻¹	$\approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Перетворення між масою, молями та частинками

Будь-яку задачу цього типу зручно розглядати як перехід між трьома характеристиками: масою m , кількістю речовини n і числом структурних одиниць N . Молярна маса є коефіцієнтом переходу між масою та кількістю речовини, а стала Авогадро — між кількістю речовини та числом частинок. Якщо відома маса зразка, спочатку визначають молярну масу за формулою, далі знаходять кількість речовини, а вже потім — число частинок.

При порівнянні двох однакових за масою зразків різних елементів число атомів може істотно відрізнятись. Наприклад, атомна маса Карбону приблизно вдвічі менша за атомну

масу Магнію. Тому один грам Карбону містить приблизно вдвічі більше атомів, ніж один грам Магнію. Цей висновок одержують без підрахунку кожного атома — достатньо порівняти кількості речовини для однакових мас.

Під час використання формул необхідно узгоджувати одиниці вимірювання. Якщо молярну масу подано у грамах на моль, масу в чисельнику також потрібно виражати в грамах. Якщо масу задано в кілограмах, її спочатку переводять у грами або користуються молярною масою в кг/моль. Аналогічно число молекул, атомів та інших частинок можна знаходити лише після уточнення, що саме в умові задачі вважають структурною одиницею речовини.

Визначення, формули та приклад для води: [2, с. 10–13].

5. Основні закони хімії

Закон збереження маси

Закон збереження маси формулюють так: маса речовин, що вступили в хімічну реакцію, дорівнює масі речовин, які утворилися внаслідок реакції, якщо враховано всі реагенти та продукти в замкненій системі. Під час звичайних хімічних перетворень атоми не зникають і не виникають, а лише змінюють порядок сполучення. Саме тому кількість атомів кожного елемента ліворуч і праворуч у правильно складеному рівнянні має бути однаковою.

$$m(\text{реагентів}) = m(\text{продуктів}) \quad (1.13)$$

Закон є підґрунтям для матеріального балансу і будь-якого кількісного розрахунку за рівнянням реакції. Якщо під час досліду спостерігається зменшення маси відкритої посудини, це може бути зумовлено виходом газоподібного продукту із системи. Для перевірки закону потрібно враховувати масу всіх утворених речовин, включно з газами.

Закон сталості складу і закон кратних співвідношень

Закон сталості складу для сполук сталого складу встановлює, що певна чиста речовина має постійний якісний і кількісний склад незалежно від способу її добування. Для води масове співвідношення Оксигену до Гідрогену становить приблизно 8 : 1. Водночас для деяких твердих сполук існує область змінного складу; під час застосування закону потрібно враховувати тип речовини.

Закон кратних співвідношень описує ситуацію, коли два елементи утворюють кілька сполук: маси одного елемента, що сполучаються з однаковою масою другого, відносяться як прості цілі числа. Так, у CO та CO₂ на однакову кількість Карбону припадають різні кількості Оксигену у співвідношенні 1 : 2.

Закон	Зміст для розрахунків	Ілюстрація
Збереження маси	Загальна маса вихідних речовин дорівнює масі всіх продуктів	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Закон	Зміст для розрахунків	Ілюстрація
Сталості складу	Сполука сталого складу має незмінне співвідношення мас елементів	H : O у воді = 1 : 8
Кратних співвідношень	Для кількох сполук двох елементів маси одного елемента при сталій масі другого відносяться як невеликі цілі числа	CO та CO ₂ : O = 1 : 2

Закон еквівалентів

Закон еквівалентів виражає співвідношення мас речовин, що взаємодіють: вони пропорційні своїм еквівалентним масам для відповідної реакції. Еквівалентна маса залежить від конкретного хімічного перетворення та числа заміщуваних атомів Гідрогену, гідроксильних груп або електронів, що беруть участь у процесі. Тому її не слід механічно ототожнювати з молярною масою; для окремого реагенту вона може бути меншою за молярну масу в декілька разів.

$$m(A) / m(B) = E(A) / E(B) \quad (1.14)$$

Для простої нейтралізації сульфатної кислоти двома молями лугу NaOH один моль H₂SO₄ відповідає двом молям реакційноздатних гідроксильних груп. Тому в цій реакції еквівалентну масу кислоти обчислюють як молярну масу, поділену на два: приблизно 98/2 = 49 г на моль еквівалентів. Пізніше ці співвідношення використовують під час вивчення кислотно-основних процесів і розрахунків концентрацій розчинів.

У правильно складеному рівнянні кількість атомів кожного елемента однакова до й після реакції — це дозволяє перевірити стехіометричні коефіцієнти.

Формулювання і приклади законів: [1, с. 11–12]; [2, с. 13–20].

6. Газові закони та об'ємні співвідношення

Закон Авогадро стверджує: за однакових температури й тиску рівні об'єми різних газів містять однакове число молекул. Отже, один моль різних ідеальних газів за одних і тих самих умов займає однаковий об'єм. Для шкільних і базових навчальних розрахунків часто використовують молярний об'єм газу 22,4 л/моль за нормальних умов: температури близько 273,15 K та тиску 101325 Па.

$$V = n \cdot V_m \quad (1.15)$$

$$n = V / V_m \quad (1.16)$$

$$V_m \approx 22,4 \text{ л/моль (н. у.)} \quad (1.17)$$

Молярний об'єм стосується газоподібних речовин за обумовлених температури й тиску. Його не можна безпосередньо застосовувати до рідини чи твердого тіла; для іншого стану газу потрібно використовувати дані, задані в умові задачі, або відповідне газове

рівняння. У задачах за реакціями газів об'ємні співвідношення за однакових умов дорівнюють співвідношенням кількостей речовини.

Закон об'ємних співвідношень

Згідно із законом об'ємних співвідношень Гей-Люссака, об'єми газів, що взаємодіють, і газоподібних продуктів за однакових температури й тиску відносяться як прості цілі числа. Ці числа відповідають стехіометричним коефіцієнтам рівняння реакції за умови, що всі речовини, об'єми яких порівнюють, перебувають у газоподібному стані.



$$V(\text{H}_2) : V(\text{O}_2) : V(\text{H}_2\text{O}) = 2 : 1 : 2 \quad (1.19)$$

Наприклад, для повного згоряння двох об'ємів водню потрібен один об'єм кисню, а за температури, за якої вода залишається парою, утворюються два об'єми водяної пари. Вихідні об'єми й об'єми продуктів потрібно порівнювати за однакових температури та тиску.

Для визначення об'єму продукту спочатку складають урівняне рівняння реакції, потім установлюють відношення коефіцієнтів газоподібних речовин. Якщо у задачі задають масу реагенту, її перетворюють на кількість речовини, після чого обчислюють шуканий об'єм через V_m .

Послідовність переходу від маси до об'єму

У розрахунках газоподібних реагентів і продуктів інколи одночасно використовують масу, кількість речовини й об'єм. Наприклад, якщо відома маса газу, спочатку її ділять на молярну масу та отримують кількість речовини. Далі, за потреби, використовують молярний об'єм, що відповідає заданим умовам. Коли об'єм газу відомий, порядок обчислення є зворотним: спочатку визначають кількість речовини, потім за молярною масою знаходять масу.

$$n = m / M \rightarrow V = n \cdot V_m \quad (1.20)$$

$$n = V / V_m \rightarrow m = n \cdot M \quad (1.21)$$

Для одного моля кисню O_2 молярна маса дорівнює приблизно 32 г/моль, а об'єм за нормальних умов — близько 22,4 л. Для одного моля водню H_2 маса становить приблизно 2 г, але об'єм за тих самих умов залишається таким самим. Рівність молярних об'ємів різних газів за однакових умов є прямим наслідком закону Авогадро; вона не означає рівності їхніх мас або густини.

За законом об'ємних співвідношень коефіцієнти реакції можна безпосередньо застосовувати до об'ємів лише за відповідних обмежень. Насамперед усі порівнювані речовини мають бути газами, а температура і тиск для об'ємів, що порівнюються, повинні бути однаковими. Якщо продукт конденсується, його об'єм як рідини вже не дорівнюватиме стехіометричному газовому співвідношенню. У такому випадку розрахунок проводять через молі.

Газові закони та молярний об'єм: [1, с. 12]; [2, с. 12–13, 23].

7. Кількісні розрахунки за рівняннями реакцій

Стехіометричні коефіцієнти в урівняному хімічному рівнянні показують відношення кількостей речовини, що вступають у реакцію та утворюються внаслідок неї. Послідовність розрахунку: скласти формули реагентів і продуктів; урівняти рівняння; перевести відому масу або об'єм у кількість речовини; за коефіцієнтами визначити кількість потрібної речовини; обчислити масу або об'єм результату.

Приклад розрахунку за масою

Під час реакції магнію з киснем утворюється оксид магнію. Урівняне рівняння реакції має вигляд:



З рівняння видно, що з двох молів магнію утворюються два молі оксиду магнію, тобто кількості цих речовин рівні. Якщо взяти 24 г магнію, це приблизно один моль; за достатньої кількості кисню можна одержати один моль MgO масою близько 40 г. Різниця мас пояснюється тим, що до магнію приєднався кисень: маса кисню у продукті становить приблизно 16 г.

$$n(\text{Mg}) = m(\text{Mg}) / M(\text{Mg}) \quad (1.23)$$

$$n(\text{MgO}) = n(\text{Mg}) \quad (1.24)$$

$$m(\text{MgO}) = n(\text{MgO}) \cdot M(\text{MgO}) \quad (1.25)$$

Теоретичний і фактичний результат

Стехіометричне рівняння дає теоретичну кількість продукту за умови повного перебігу реакції без втрат. На практиці частина реагенту може залишитися невикористаною, а продукт може втрачатися під час відділення чи перенесення. Тому під час навчального розрахунку розрізняють теоретичний вихід і фактично одержану кількість продукту. За відомими значеннями обчислюють частку фактичного результату від теоретичного.

$$\eta = m(\text{фактична}) / m(\text{теоретична}) \cdot 100 \% \quad (1.26)$$

Коли в умові наведені кількості обох реагентів, спочатку визначають, який із них витратиться повністю. Саме за цим, обмежувальним, реагентом обчислюють теоретичну кількість продукту. Такі матеріальні баланси є продовженням закону збереження маси та рівнянь хімічних реакцій.

Перевірка розрахунку матеріальним балансом

Матеріальний баланс складають для всіх реагентів і продуктів, а не лише для шуканої речовини. У розглянутому прикладі один моль магнію масою близько 24 г реагує з половиною моля кисню масою близько 16 г. Маса продукту становить приблизно 40 г, тому загальна маса реагентів дорівнює масі продукту. Це підтверджує взаємозв'язок стехіометричних коефіцієнтів із законом збереження маси.

Розрахунок завжди починається з правильно складеної хімічної формули та урівняного рівняння. Якщо вказано, що один із реагентів узятो в надлишку, кількість продукту визначають за другим реагентом. Якщо такої умови немає, кількості обох реагентів порівнюють зі стехіометричним співвідношенням. Для навчальної задачі це можна зробити, розділивши кількість кожного реагенту в молях на його коефіцієнт: менший результат вказуватиме на реагент, який обмежує перебіг реакції.

За допомогою рівняння можна розраховувати не тільки масу продукту, а й об'єм газу, кількість утворених йонів у розчині або масу речовини, що вступає в реакцію. Якщо відомий практичний вихід, після теоретичного розрахунку результат множать на частку виходу. Величину виходу у відсотках попередньо ділять на сто. Такі перетворення складають основу майбутніх практичних робіт із хімічного складу матеріалів, реакцій розкиснення та кількісних витрат речовин.

Розрахункова основа: [2, с. 12–13, 23–24]; [1, с. 11–12].

8. Агрегатні стани та їх значення для хімічних процесів

Речовини існують у різних агрегатних станах. Для твердого стану характерне відносно впорядковане розміщення частинок, для рідкого — збереження близьких міжчастинкових відстаней за можливості переміщення, для газоподібного — значно більші середні відстані між частинками. Перехід між станами залежить від температури й тиску та супроводжується поглинанням або виділенням енергії.

Опис агрегатних станів і наведені нижче ілюстрації: [1, с. 13–14].



Рис. 1.1. Розташування частинок у різних агрегатних станах

Плавлення — перехід із твердого стану в рідкий; тверднення — зворотний процес. Пароутворення переводить рідину в газоподібний стан, а конденсація — газ у рідину. Безпосередній перехід твердої речовини в газоподібний стан називають сублимацією. Під час фізичного переходу між агрегатними станами хімічний склад речовини може залишатися незмінним.



Рис. 1.2. Основні переходи між агрегатними станами

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються поняття хімічного елемента, атома та простої речовини?
2. Як знайти кількість речовини за масою та за числом частинок?
3. У чому полягає закон збереження маси?
4. За яких умов можна використовувати молярний об'єм 22,4 л/моль?

Використана література

1. Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 7–17.
2. Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 9–24.
3. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. Основні поняття та кількісні співвідношення.
4. Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія».
5. Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про атомно-молекулярне вчення та основні закони.

ТЕМА 2

БУДОВА РЕЧОВИНИ: АТОМ, ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН ТА ХІМІЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК

1. Поняття про будову речовини та її значення для властивостей матеріалів

Мета лекції. Пояснити будову атома, зміст періодичного закону та основні типи хімічного зв'язку; показати, як будова частинок визначає властивості речовин і технічних матеріалів.

План лекції

1. Склад атома, ізографи та електронна оболонка. 2. Розміщення електронів в атомі. 3. Періодичний закон і періодична система. 4. Закономірності зміни властивостей елементів. 5. Йонний, ковалентний і металічний зв'язки. 6. Будова кристалічних речовин та зв'язок будови з властивостями.

1.1. Від речовини до частинок, що її утворюють

Речовини відрізняються не тільки хімічним складом, а й способом розташування та взаємодії частинок. Наприклад, тверді метали проводять електричний струм, кристали кухонної солі за звичайних умов його практично не проводять, а розплав солі стає провідником. Для пояснення цих відмінностей недостатньо знати лише хімічні формули: потрібно розуміти будову атомів, вид зв'язку між ними та будову твердої речовини.

Вихідним поняттям є хімічний елемент — сукупність атомів з однаковим зарядом ядра. Атоми можуть об'єднуватися в молекули, утворювати йони або формувати кристалічні ґратки. У молекулярній речовині відносно відокремленою частинкою є молекула; в йонному кристалі існує впорядкована система катіонів і аніонів; у металі атомні остови розташовані в кристалі та взаємодіють із делокалізованими електронами.

Розвиток атомних уявлень пов'язаний із результатами експериментів. Досліди з розсіюванням заряджених частинок показали, що позитивний заряд і майже вся маса атома зосереджені в дуже малому ядрі. Електрони утворюють електронну оболонку, яка займає більшу частину об'єму атома. Сучасний опис електронів спирається на уявлення про орбіталі, однак для початкового вивчення достатньо розрізняти ядро, електронну оболонку та валентні електрони.

Будова зовнішнього електронного шару визначає типові хімічні властивості елемента. Саме зовнішні електрони насамперед беруть участь в утворенні зв'язків і реакціях, що супроводжуються утворенням йонів. У подальшому ці закономірності допоможуть зрозуміти активність металів, утворення поверхневих оксидів і вплив сплавотворних елементів на матеріали.

Джерела розділу: [1, розд. 2–3]; [2, теми 2–3]. [4, розд. 1]

2. Ядро атома, електрони та ізотопи

2.1. Основні частинки атома

Ядро містить протони та нейтрони. Протон має позитивний заряд, нейтрон електрично нейтральний; електрон має негативний заряд. Заряди протона й електрона рівні за модулем. У нейтральному атомі кількість електронів дорівнює кількості протонів. Під час утворення катіона атом утрачає частину електронів, під час утворення аніона — приєднує їх.

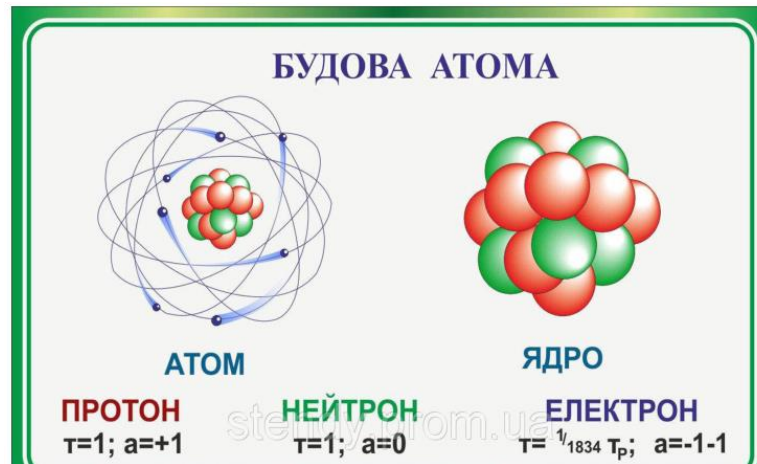


Рис. 2.1. Схематична будова атома та його складові частини

Порядковий номер елемента Z у періодичній системі дорівнює числу протонів у ядрі. Масове число A — сумарне число протонів і нейтронів у ядрі певного нукліда. Кількість нейтронів N_n визначають відніманням Z від A . Наприклад, для нукліда натрію $^{23}_{11}\text{Na}$ ядро містить 11 протонів і 12 нейтронів; нейтральний атом має 11 електронів.

$$A = Z + N_n \quad (2.1)$$

$$N_n = A - Z \quad (2.2)$$

Ізотопи — атоми одного хімічного елемента, які мають однаковий заряд ядра, але відрізняються кількістю нейтронів. Через це ізотопи мають різні масові числа. Хімічні властивості елементів насамперед визначаються електронною будовою, а не числом нейтронів, тому ізотопи одного елемента мають близькі хімічні властивості.

Позначення нукліда записують так: біля символу елемента ліворуч угорі ставлять масове число A , а ліворуч унизу — порядковий номер Z . Відносна атомна маса елемента в періодичній системі зазвичай не є цілим числом, оскільки враховує природний ізотопний склад. У звичайних навчальних розрахунках молярних мас використовують наведені в таблиці відносні атомні маси або обумовлені округлення.

Джерела розділу: [2, с. 22–25]; [3, розд. 1].

3. Електронна оболонка й електронні конфігурації

3.1. Енергетичні рівні та орбіталі

Електрони розміщуються в атомі за певними енергетичними станами. Для початкового пояснення оболонку поділяють на енергетичні рівні з головним квантовим числом n . Кожний

рівень може містити певну максимальну кількість електронів; підрівні позначають літерами s, p, d, f. Орбіталь описує область простору, в якій імовірність виявити електрон є найбільшою. На одній орбіталі може перебувати не більше двох електронів із протилежними спінами.

$$N_e(\max) = 2n^2 \quad (2.3)$$

Формула $2n^2$ задає максимально можливу кількість електронів на рівні з номером n, але сама по собі не встановлює фактичного порядку заповнення всіх рівнів. Електрони заповнюють доступні орбіталі в порядку зростання енергії з урахуванням принципу Паулі та правила Гунда. У першому наближенні для елементів перших трьох періодів достатньо розуміти заповнення рівнів 1s, 2s, 2p, 3s і 3p.

Таблиця 2.1. Місткість найважливіших підрівнів

Підрівень	Кількість орбіталей	Максимум електронів
s	1	2
p	3	6
d	5	10
f	7	14

3.2. Приклади запису електронних конфігурацій

У Гідрогену один електрон: $1s^1$; у Гелію — два: $1s^2$. Атом Літію має електронну конфігурацію $1s^2 2s^1$. У Натрію одинадцять електронів, його конфігурація — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. В останньому прикладі один електрон зовнішнього рівня пояснює характерну для Натрію здатність утворювати катіон Na^+ . Для Хлору зовнішня конфігурація $3s^2 3p^5$; атомові бракує одного електрона до заповненої зовнішньої оболонки, тому можливе утворення Cl^- .

Валентними називають електрони, що беруть участь в утворенні хімічного зв'язку. Кількість зовнішніх електронів для багатьох елементів головних підгруп допомагає передбачити типові ступені окиснення та характер утворюваних сполук. Однак валентність і ступінь окиснення не тотожні: перше поняття описує число зв'язків, друге — умовний заряд атома за прийнятого способу розподілу електронів.

Джерела розділу: [1, с. 38–45]; [2, с. 22–28].

4. Періодичний закон і закономірності зміни властивостей

4.1. Періоди, групи та сучасне формулювання закону

Періодичний закон встановлює закономірну залежність властивостей хімічних елементів та їхніх сполук від заряду ядра атома. У періодичній системі елементи розміщені за зростанням порядкового номера. Горизонтальні ряди називають періодами, вертикальні — групами. Елементи однієї групи нерідко мають подібну будову зовнішніх електронних оболонок, а тому виявляють подібні хімічні властивості.

Для елементів головних груп число зовнішніх електронів часто узгоджується з номером відповідної групи в традиційному позначенні. Наприклад, Літій, Натрій і Калій містять по одному зовнішньому електрону та утворюють катіони із зарядом +1. Флуор і Хлор мають по сім зовнішніх електронів та схильні приєднувати один електрон. У перехідних металів картина складніша через участь d-електронів, тому просте правило зовнішнього шару застосовують до них обережно.

4.2. Атомні радіуси, енергія іонізації та електронегативність

У межах періоду зі збільшенням заряду ядра атомні радіуси зазвичай зменшуються, а здатність атомів утримувати зовнішні електрони зростає. У межах групи зверху вниз кількість зайнятих електронних рівнів збільшується, тому розміри атомів зазвичай зростають. Енергія іонізації — енергія, необхідна для відривання електрона від вільного атома в газовому стані. Її зміна є періодичною, а не строго монотонною через особливості будови підрівнів.

Електронегативність характеризує здатність атома притягувати спільну електронну густину у зв'язку. Порівняння електронегативностей двох атомів дає можливість попередньо оцінити полярність зв'язку. Висока електронегативність характерна для неметалів, низька — для багатьох активних металів. Межі між типами зв'язків умовні: у реальних сполуках можуть поєднуватися різні внески в характер зв'язку.

Хімічний характер оксидів і гідроксидів також закономірно змінюється. Для активних металів типовими є основні оксиди, для багатьох неметалів — кислотні. Деякі оксиди й гідроксиди виявляють амфотерні властивості, тобто можуть реагувати і з кислотами, і з лугами. Цей зв'язок між місцем елемента в системі та властивостями його сполук стане основою наступної лекції.

Джерела розділу: [1, с. 46–59]; [2, с. 18–21]. [5, розд. про періодичний закон]

5. Йонний та ковалентний хімічний зв'язок

5.1. Йонний зв'язок

Йонний зв'язок виникає завдяки електростатичному притяганню протилежно заряджених йонів. Типовий навчальний приклад — натрій хлорид. Атом Натрію має один електрон зовнішнього рівня та може втратити його, а атом Хлору може приєднати електрон. У кристалі NaCl ці йони не об'єднані в окремі молекули: вони утворюють упорядковану тривимірну ґратку.



Кристали йонних сполук зазвичай мають порівняно високі температури плавлення та є крихкими. У твердому стані йони закріплені у вузлах ґратки, тому електропровідність мала. У розплаві та водному розчині рухливі йони можуть переносити електричний заряд. Не всі

йонні сполуки добре розчиняються у воді: розчинність залежить від співвідношення взаємодії йонів у кристалі та в розчиннику.

5.2. Ковалентний зв'язок

Ковалентний зв'язок утворюється завдяки спільним електронним парам атомів. У молекулі водню H_2 два атоми Гідрогену використовують спільну електронну пару. Якщо атоми однакові, спільна пара розподілена симетрично і зв'язок є неполярним. У молекулі HCl атом Хлору сильніше притягує електронну густину, тому зв'язок полярний. У молекулах можуть існувати одинарні, подвійні й потрійні зв'язки залежно від числа спільних електронних пар.

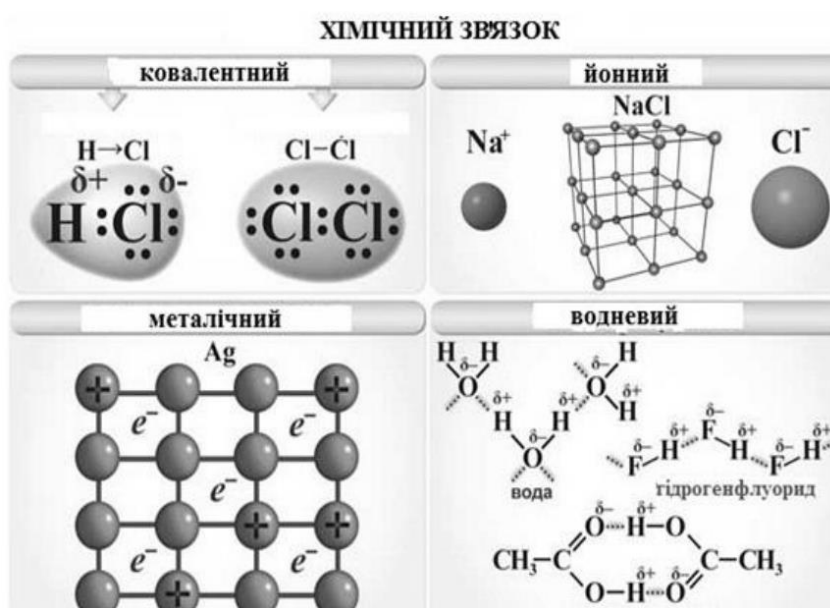


Рис. 2.2. Порівняння основних типів хімічного зв'язку

Для речовин із ковалентним зв'язком агрегатний стан і температура плавлення залежать від того, чи існують окремі молекули, чи атоми зв'язані в суцільну просторову сітку. Наприклад, речовини з атомними кристалічними ґратками істотно відрізняються від простих молекулярних речовин. Отже, сам термін «ковалентний зв'язок» ще не визначає всіх фізичних властивостей матеріалу.

Джерела розділу: [1, розд. 3]; [2, с. 32–38].

6. Металічний та водневий зв'язки

6.1. Металічний зв'язок

У металевих кристалах позитивні атомні остови взаємодіють із електронами, які не належать одній певній парі сусідніх атомів. Такий зв'язок називають металічним. Узагальнена картина пояснює високу електричну й теплову провідність багатьох металів, їхню здатність до пластичної деформації та характерний металічний блиск. Водночас конкретні властивості металу визначаються також будовою його кристалічної ґратки, дефектами й хімічним складом.

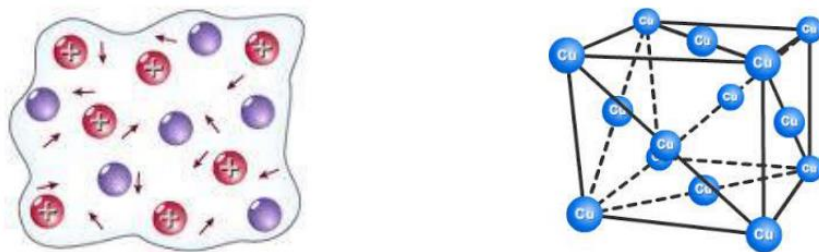


Рис. 2.3. Схематичне зображення металічного зв'язку

Під час прикладного вивчення металів важливо відрізнити тип хімічного зв'язку від технологічних властивостей: міцність сталі, наприклад, не визначається лише фактом наявності металічного зв'язку. На неї впливають кількість вуглецю, легувальні елементи, фазовий склад і термічна історія матеріалу. Проте загальне розуміння металевої структури необхідне для подальшого вивчення сплавів, зварювання та корозії.

6.2. Водневий зв'язок і міжмолекулярні взаємодії

Водневий зв'язок може виникати за участю атома Гідрогену, сполученого з сильно електронегативним атомом, і неподіленої електронної пари іншого електронегативного атома. Для води водневі зв'язки впливають на структуру рідини, температуру кипіння та низку її фізичних властивостей. Це не той самий тип зв'язку, що звичайний ковалентний О–Н усередині молекули H_2O .

Між молекулами діють також слабші міжмолекулярні сили. Їхня сукупність визначає агрегатний стан молекулярних речовин і впливає на леткість, температуру плавлення та розчинність. Для розуміння розчинів важливо, що розчинення залежить не тільки від будови речовини, але й від нових взаємодій частинок із молекулами розчинника. Саме тому йонні, полярні й неполярні речовини поведуться у воді неоднаково.

Зв'язки в складних технічних матеріалах не завжди вкладаються в одну ідеальну модель. У сплавах, оксидах, нітридах і кераміці можуть одночасно проявлятися різні види хімічної взаємодії. При вивченні конкретного матеріалу спершу визначають його склад та будову, а вже потім зіставляють їх із властивостями.

Джерела розділу: [1, с. 60–85]; [2, с. 40–45].

7. Кристалічні ґратки та властивості твердих речовин

7.1. Чотири навчальні типи кристалічних речовин

Кристалічні речовини мають упорядковане розміщення частинок. У навчальній класифікації розглядають молекулярні, йонні, атомні та металічні кристалічні ґратки. Їхня будова пояснює відмінності в електропровідності, механічних властивостях і поведінці під час нагрівання. Відповідність між видом ґратки та властивістю не є абсолютно жорсткою: для окремих речовин можливі винятки.

Таблиця 2.2. Зв'язок будови кристалічних речовин із властивостями

Тип ґратки	Частинки у вузлах	Характерна ознака	Приклад
Молекулярна	Молекули	Зазвичай відносно низькі температури плавлення	I ₂ , лід
Йонна	Катіони й аніони	Крихкість, провідність розплавів	NaCl
Атомна	Атоми	Часто висока твердість	Алмаз, SiO ₂
Металічна	Атомні остови, електрони	Пластичність, провідність	Fe, Cu

Молекулярні кристали утримуються порівняно слабкими міжмолекулярними взаємодіями. Йонні кристали побудовані з протилежно заряджених йонів; зміщення їхніх шарів може призвести до зближення однойменно заряджених йонів і розколювання кристала. В атомних кристалах зв'язки утворюють протяжну сітку, тому їх руйнування потребує значної енергії. Металічні кристали допускають зміщення атомних шарів без негайного руйнування всього зв'язувального електронного середовища.

7.2. Чому кристалічні структури важливі для технічних металів

У твердих металів існують різні типи просторового упорядкування атомів. При зміні температури в окремих металів може змінюватися тип кристалічної структури. Хімічний склад сплаву та наявність домішок впливають на фазовий стан і властивості. Під час зварювання метал зазнає нагрівання, плавлення та наступної кристалізації; для розуміння цих процесів необхідні уявлення про частинки та їхній зв'язок, але докладні фазові перетворення вивчають у спеціальних дисциплінах.

Під час роботи з періодичною системою доцільно встановлювати ланцюжок «будова електронної оболонки — положення елемента — типові хімічні властивості — характер сполук». Він допомагає пояснювати, чому алюміній утворює оксидну плівку, натрій є активним металом, а вуглець може утворювати речовини з різко відмінними властивостями. Це перехід від запам'ятовування окремих фактів до розуміння закономірностей.

Джерела розділу: [2, с. 42–46]; [3, розд. 3].

8. Приклади аналізу будови речовини та підсумок

8.1. Послідовність характеристики елемента

Щоб охарактеризувати елемент за періодичною системою, знаходять його порядковий номер, номер періоду і групи, записують електронну конфігурацію та визначають зовнішні електрони. Далі з урахуванням положення у періодичній системі роблять обережний висновок щодо його металевих або неметалевих властивостей і можливих сполук. Ця послідовність застосовна насамперед до елементів головних груп; для перехідних металів потрібні додаткові відомості.

Наприклад, атом Магнію має $Z = 12$ та електронну конфігурацію $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$. Два електрони зовнішнього рівня можуть бути віддані з утворенням Mg^{2+} . З атомами Оксигену Магній утворює йонну сполуку MgO . Атом Оксигену має конфігурацію $1s^2 2s^2 2p^4$ і шість електронів зовнішнього рівня; під час утворення оксиду він набуває формального заряду -2 . Формула MgO відображає співвідношення йонів 1:1.



Характер хімічного зв'язку не можна надійно визначати лише за наявністю металу або неметалу у формулі. Для навчальної класифікації використовують сукупність відомостей: різницю електронегативностей, будову речовини та її властивості. Зокрема, полярність окремого зв'язку і полярність молекули — різні характеристики: у симетричній молекулі дипольні моменти окремих полярних зв'язків можуть взаємно компенсуватися.

Підсумок теми: заряд ядра встановлює місце елемента в періодичній системі; електронна оболонка визначає характерні хімічні властивості; тип зв'язку та будова твердого тіла пояснюють низку властивостей речовин. Ці положення є теоретичною основою подальшого вивчення класів неорганічних сполук, розчинів і хімічних процесів у металевих матеріалах.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняється хімічний елемент від простої речовини?
2. Чому ізотопи мають однаковий порядковий номер?
3. Як зовнішні електрони пов'язані з властивостями групи?
4. Чим відрізняються йонний та ковалентний зв'язки?
5. Чому твердий $NaCl$ не проводить струм, а його розплав проводить?
6. Які властивості металів пояснює металічний зв'язок?

Використані джерела

- [1] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи 2–3.
- [2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 2–3.
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи 1–3.
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія».
- [5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про атом, періодичну систему і хімічний зв'язок.

ТЕМА 3

ОСНОВНІ КЛАСИ НЕОРГАНІЧНИХ СПОЛУК ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ХІМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

1. Класифікація неорганічних речовин та її практичне значення

Мета лекції. Систематизувати відомості про оксиди, основи, кислоти й солі; навчитися визначати клас речовини за формулою та передбачати найважливіші типи її хімічних перетворень.

План лекції

1. Прості й складні речовини. 2. Оксиди та їхні хімічні властивості. 3. Основи й амфотерні гідроксиди. 4. Кислоти та солі. 5. Реакції між класами речовин. 6. Генетичні зв'язки та приклади перетворень речовин.

1.1. Прості та складні речовини

Прості речовини утворені атомами одного хімічного елемента, а складні — атомами різних елементів. До простих речовин належать метали й неметали. Складні неорганічні речовини в навчальній класифікації поділяють на оксиди, основи, кислоти та солі. Окремо розглядають амфотерні сполуки, які можуть виявляти властивості і основ, і кислот.

Хімічну класифікацію використовують не лише для запам'ятовування назв. Вона дозволяє визначити, з якими речовинами можливі типові реакції, які продукти можуть утворюватися та які рівняння потрібні для кількісних розрахунків. Наприклад, знання про кислотний характер деяких оксидів допомагає пояснити їхню взаємодію з лугами; основний характер оксиду кальцію — його реакцію з водою та кислотами.



Рис. 3.1. Схема класифікації неорганічних речовин

За формулою спершу визначають набір елементів. Якщо речовина містить Оксиген і лише один інший елемент, її зазвичай відносять до оксидів. Якщо сполука містить гідроксильні групи OH , потрібно з'ясувати, чи є вона основою або амфотерним гідроксидом. Водневмісні кислоти містять атоми Гідрогену, які можуть заміщуватися на катіони металів;

солі містять катіони й аніони кислотних залишків. Ці ознаки є вихідними навчальними правилами, але не описують усю різноманітність неорганічної хімії.

Джерела розділу: [1, с. 49–50]; [2, розд. 1]. [4, розд. про класи сполук]

2. Оксиди: класифікація та реакційні властивості

2.1. Поняття оксиду

Оксидами називають бінарні сполуки Оксигену з іншим елементом, у яких Оксиген має ступінь окиснення -2 . За характером хімічних властивостей розрізняють основні, кислотні, амфотерні та несолетворні оксиди. Віднесення до групи визначається реакціями речовини, а не лише тим, метал чи неметал входить до її складу: існують амфотерні оксиди металів і оксиди вищих ступенів окиснення з кислотними властивостями.

Таблиця 3.1. Хімічні групи оксидів та характерні ознаки

Група оксидів	Характерна ознака	Приклад
Основні	Реагують з кислотами	CaO, MgO
Кислотні	Реагують з лугами	SO ₃ , CO ₂
Амфотерні	Реагують з кислотами та сильними лугами	Al ₂ O ₃ , ZnO
Несолетворні	За звичайних умов не утворюють солей із кислотами та основами	CO, NO

2.2. Реакції оксидів

Основні оксиди можуть реагувати з кислотами з утворенням солі та води. Деякі основні оксиди активних металів взаємодіють із водою, утворюючи основи; наприклад, CaO перетворюється на Ca(OH)₂. Кислотні оксиди взаємодіють із лугами з утворенням солей; частина з них реагує з водою з утворенням відповідних кислот. Тому для правильного запису рівняння важливо знати конкретний оксид.



Амфотерні оксиди, зокрема Al₂O₃ та ZnO, можуть реагувати як із кислотами, так і з сильними лугами. На відміну від них, CO і NO в межах базової класифікації розглядають як несолетворні оксиди. Взаємодія оксидів між собою також може призводити до утворення солей: наприклад, основний оксид CaO взаємодіє з кислотним оксидом CO₂ з утворенням CaCO₃. Це один із найпростіших прикладів хімічного зв'язку між різними класами сполук.



Назва оксиду має відображати елемент і, якщо він виявляє декілька ступенів окиснення, його ступінь окиснення: FeO — ферум(II) оксид, Fe₂O₃ — ферум(III) оксид. У

розрахунках саме правильна формула, а не лише словесна назва, визначає молярну масу та співвідношення реагентів.

Джерела розділу: [1, с. 50–52]; [2, розд. 1].

3. Основи та амфотерні гідроксиди

3.1. Склад і номенклатура основ

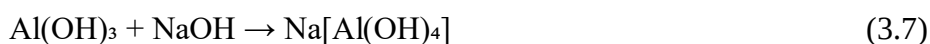
Основи — сполуки, які у спрощеному навчальному описі складаються з катіонів металів та гідроксид-іонів OH^- . Загальна формула для одновалентного катіона має вигляд MOH , для двовалентного — M(OH)_2 . Наприклад, NaOH називають натрій гідроксидом, а Ca(OH)_2 — кальцій гідроксидом. Основи, які добре розчиняються у воді, називають лугами. Не всі гідроксиди металів розчинні: Cu(OH)_2 і Fe(OH)_3 утворюють малорозчинні осади.

Найхарактернішою хімічною властивістю основ є реакція з кислотами — нейтралізація, у результаті якої утворюються сіль і вода. Розчинні основи можуть реагувати з кислотними оксидами; за відповідних умов вони можуть взаємодіяти з розчинами солей, якщо один із продуктів виводиться з розчину у вигляді осаду або іншого слабкодисоційованого продукту.



3.2. Амфотерні гідроксиди

Амфотерні гідроксиди можуть реагувати і з кислотами, і з надлишком сильного лугу. У початковому курсі типовими прикладами є Al(OH)_3 та Zn(OH)_2 . В кислому середовищі вони утворюють солі відповідних катіонів; у лужному середовищі за певних умов утворюють комплексні гідроксисполуки. Ця поведінка відображає проміжний характер деяких елементів і їхніх сполук.



Таблиця 3.2. Приклади гідроксидів у загальній класифікації

Група	Приклад	Характерна властивість
Розчинна основа (луг)	NaOH	Реагує з кислотами й кислотними оксидами
Малорозчинна основа	Cu(OH)_2	Утворює осад, взаємодіє з кислотами
Амфотерний гідроксид	Al(OH)_3	Реагує і з кислотами, і з надлишком лугу

Розчинність та можливі реакції не слід визначати лише за зовнішнім виглядом речовини. Для конкретного гідроксиду користуються таблицею розчинності й відомостями

про хімічні властивості. Під час розв'язування задач спочатку складають рівняння, потім урівнюють його та лише після цього переходять до кількості речовини і мас.

Джерела розділу: [1, с. 52–54]; [3, розд. про елементи III групи].

4. Кислоти: склад, класифікація та реакції

4.1. Склад і назви кислот

Кислоти — сполуки, у яких містяться атоми Гідрогену, здатні заміщуватися катіонами металів, і кислотний залишок. За наявністю Оксигену їх поділяють на оксигеновмісні (H_2SO_4 , HNO_3) та безоксигенові (HCl , H_2S). За числом атомів Гідрогену, що можуть заміщуватися, розрізняють одно-, дво- й багатоосновні кислоти. Цей поділ не слід плутати зі силою кислоти: наприклад, одноосновні кислоти можуть бути як сильними, так і слабкими.

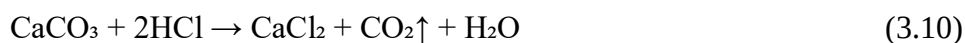
У водному розчині кислоти створюють кислотне середовище завдяки утворенню гідратованих іонів Гідрогену. Докладніше кислотність і водневий показник буде розглянуто в лекції про електроліти. Для цієї теми основне — навчитися розпізнавати кислоти за формулами та складати найпростіші рівняння їхніх реакцій.

4.2. Взаємодія кислот з іншими речовинами

Кислоти взаємодіють з основами та багатьма основними оксидами з утворенням солей і води. Для кислот-неокисників із достатньо активними металами характерне виділення водню; однак умови реакції залежать від природи металу, концентрації та властивостей конкретної кислоти. Концентрована нітратна та сульфатна кислоти можуть виявляти властивості окисників, тому загальну схему «метал + кислота → сіль + H_2 » застосовують не до всіх кислот.



Кислота може взаємодіяти із сіллю, якщо утворюється осад, газ або інший продукт, що сприяє перебігу реакції. Наприклад, карбонати з кислотами утворюють нестійку карбонатну кислоту, яка розкладається з виділенням CO_2 . За цим явищем у хімічному аналізі розпізнають карбонат-іони. Рівняння необхідно записувати з урахуванням складу солі та стехіометричних коефіцієнтів.



Під час класифікації кислот важливо користуватися відповідними назвами та формулами. Сульфатна кислота H_2SO_4 і сульфїтна кислота H_2SO_3 відрізняються складом, ступенем окиснення Сульфуру та властивостями. Аналогічно HNO_3 і HNO_2 — не одна й та сама речовина. Помилка в індексі змінює не лише назву, а й кількісні співвідношення в рівнянні реакції.

Джерела розділу: [1, с. 54–55]; [2, розд. 1].

5. Солі та їхня класифікація

5.1. Утворення солей

Солі утворені катіонами металів або амонію та аніонами кислотних залишків. Під час повної нейтралізації кислоти основою зазвичай утворюються середня сіль і вода. Якщо багатоосновна кислота нейтралізована не повністю, можливе утворення кислої солі; якщо багатокислотна основа нейтралізована не повністю, може утворюватися основна сіль. Для розуміння цих відмінностей потрібно враховувати заряд йонів і склад формульної одиниці.

Найпоширеніші типи солей у початковому курсі — середні, кислі та основні. Середні солі: NaCl , CaCO_3 , Na_2SO_4 . Кислі солі: NaHCO_3 , NaHSO_4 . Основні солі містять гідроксильні групи поряд із кислотними залишками. Окремо виділяють подвійні та комплексні солі, однак докладний розгляд їхньої будови не є метою цієї теми.

Таблиця 3.3. Основні типи солей та приклади

Тип	Ознака	Приклад
Середня	У складі немає заміщеного кислотного Н та гідроксильних ОН	Na_2SO_4
Кисла	У кислотному залишку збережено заміщений Н	NaHCO_3
Основна	Містить гідроксильні групи та кислотний залишок	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$

5.2. Хімічні властивості солей

Солі можуть реагувати з кислотами, основами, іншими солями або металами. Реакції обміну у водних розчинах найдоцільніше аналізувати з позиції утворення малорозчинної речовини, газу або слабого електроліту. Наприклад, під час змішування розчинів барій хлориду та натрій сульфату утворюється малорозчинний BaSO_4 . Саме утворення осаду є причиною практично повного перебігу цієї реакції.



Активніший метал може витіснити менш активний метал із розчину його солі за відповідних умов. Наприклад, цинк взаємодіє з розчином купрум(II) сульфату; цинк переходить у розчин як Zn^{2+} , а мідь виділяється у вигляді металу. Ця реакція є одночасно реакцією заміщення й окисно-відновним процесом. Вона не є типовим прикладом реакції йонного обміну, адже тут змінюються ступені окиснення елементів.



Розчинність солей слід перевіряти за таблицею, а не за аналогією з однією відомою сіллю. Нітрати зазвичай добре розчинні у воді, тоді як для сульфатів і карбонатів існують

численні відмінності. Надалі ці відомості допоможуть складати йонні рівняння, пояснювати осадження сполук і розраховувати концентрації розчинів.

Джерела розділу: [1, с. 55–57]; [2, розд. 1].

6. Основні типи реакцій та умови їхнього перебігу

6.1. Реакції сполучення, розкладу, заміщення й обміну

За характером перерозподілу атомів у шкільному та початковому курсі розрізняють реакції сполучення, розкладу, заміщення й обміну. Під час сполучення з кількох реагентів утворюється один продукт; під час розкладу одна складна речовина утворює кілька продуктів. У реакції заміщення атоми простої речовини заміщують атоми елемента в складній речовині. Під час реакції обміну компоненти двох складних речовин взаємно обмінюються частинами.



Схеми класифікації дають змогу впорядкувати приклади, але самі по собі не гарантують перебігу реакції. Для прогнозування необхідно враховувати природу реагентів, їхній агрегатний стан, розчинність, температуру й інші умови. Для водних розчинів солей, кислот і основ корисне правило: реакція обміну відбувається практично до кінця, якщо серед продуктів утворюється осад, газ або слабкий електроліт, наприклад вода.

6.2. Молекулярні й скорочені йонні рівняння

Молекулярне рівняння записують формулами речовин. У повному йонному рівнянні сильні електроліти, наявні в розчині, зображають окремими йонами, тоді як осад, газ й слабкі електроліти записують без розкладання на йони. Йони, які однакові зліва і справа, скорочують. Отримане скорочене йонне рівняння показує сутність хімічного перетворення. Докладні правила дисоціації розглядатимемо в теми № 5.



Під час складання будь-якого рівняння перевіряють, чи збереглося число атомів кожного елемента, а для йонних рівнянь — також сумарний електричний заряд. Наприклад, у реакції утворення AgCl сума зарядів іонів зліва дорівнює нулю, справа продукт нейтральний. Для нейтралізації один катіон H^+ реагує з одним аніоном OH^- з утворенням однієї молекули води.

Рівняння реакцій є основою розрахунків мас і кількостей речовин. Після визначення класу реагенту студенти мають знайти можливі продукти, перевірити умови реакції та урівняти рівняння; лише після цього можна виконувати стехіометричні перетворення. Зворотний порядок часто призводить до неправильних результатів навіть за правильно підставлених числових даних.

Джерела розділу: [1, с. 49–59]; [2, розд. 1]. [5, розд. про хімічні реакції]

7. Генетичний зв'язок між класами неорганічних сполук

7.1. Взаємні перетворення простих та складних речовин

Генетичним зв'язком називають можливість переходу між різними класами неорганічних сполук у послідовності реакцій. Для металів типовим навчальним ланцюжком є «метал — основний оксид — основа — сіль», а для багатьох неметалів — «неметал — кислотний оксид — кислота — сіль». Це узагальнення: деякі оксиди не реагують із водою, не всі відповідні гідроксиди можна отримати прямим способом.



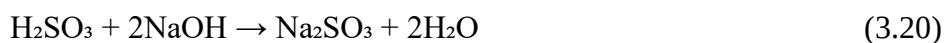
Рис. 3.2. Генетичні зв'язки між основними класами неорганічних сполук

7.2. Приклади послідовних перетворень

Розглянемо кальцій. Під час його реакції з киснем утворюється CaO ; оксид кальцію взаємодіє з водою, утворюючи Ca(OH)_2 ; після нейтралізації хлоридною кислотою одержують CaCl_2 . Усі три реакції відносяться до різних типів хімічних перетворень, але об'єднані спільним елементом Кальцієм, який зберігається у складі продуктів.



Для неметалу можна розглянути сірку: під час горіння утворюється SO_2 , який у воді утворює розчин сульфітної кислоти; її взаємодія з лугом може дати сульфід натрію. У розчинах рівновага за участю SO_2 , води та йонів складніша за шкільну схему, тому нижче наведено спрощений формальний запис, придатний для початкового розуміння класів сполук.



Спостерігаючи перетворення оксидів металів, слід враховувати, що вони можуть бути не лише основними. Алюміній утворює амфотерний Al_2O_3 , тому для нього просте правило «оксид + вода → основа» непридатне. У технологіях металів реакції утворення та руйнування

оксидних плівок мають важливе значення, але реальні процеси можуть залежати від температури, складу атмосфери й захисних середовищ.

Джерела розділу: [1, с. 57–59]; [3, розд. про оксиди та гідроксиди].

8. Застосування класифікації та підготовка до наступних тем

8.1. Приклад характеристики речовини за формулою

Щоб охарактеризувати речовину, встановлюють її якісний склад, визначають належність до класу, правильно називають сполуку, а потім перелічують типові для цього класу реакції. Наприклад, для Fe_2O_3 визначають відношення кількості атомів Феруму й Оксигену як 2:3 та ступені окиснення +3 і –2. Після цього можна записати реакцію ферум(III) оксиду з кислотою та визначити стехіометричні коефіцієнти.



В аналогічному порядку розглядають CaCO_3 : це середня сіль карбонатної кислоти. У реакції з хлоридною кислотою вона утворює CaCl_2 , CO_2 і H_2O . Якщо маса карбонату відома, за урівняним рівнянням можна визначити кількість утвореного газу. Тут матеріал теми № 3 безпосередньо поєднується з розрахунками теми № 1.

Особливе значення для подальших спеціалізованих тем мають хімічні властивості оксидів металів. Під час нагрівання та зварювання на металевій поверхні можливе утворення оксидів, а під час хімічного очищення використовують реакції з кислотами та іншими засобами. Який реагент обрати для конкретного сплаву — окреме технологічне питання, для якого знання класу речовини є необхідним, але не достатнім.

Отже, система класів неорганічних сполук є способом упорядкувати хімічні властивості та спрогнозувати найтипівіші напрямки реакцій. Під час вивчення розчинів та електролітів ми повернемося до тих самих кислот, основ і солей, але розглядатимемо їх уже як частинки у водному середовищі, з урахуванням дисоціації та кислотності.

Питання для самоперевірки

1. Які речовини називають оксидами і як їх класифікують?
2. Чим луг відрізняється від малорозчинної основи?
3. Що таке амфотерність і які сполуки її виявляють?
4. Які солі називають середніми та кислими?
5. За яких умов реакції обміну в розчині перебігають практично до кінця?
6. Які перетворення утворюють генетичний ряд металу?

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 4.

[2] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії. Харків: НТУ «ХП», 2017.

Розділ «Основні класи неорганічних сполук».

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Неорганічна хімія. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про сполуки елементів.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про основні класи неорганічних сполук.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про хімічні перетворення та основні класи сполук.

ТЕМА 4

РОЗЧИНИ ТА СПОСОБИ ВИРАЖЕННЯ ЇХ СКЛАДУ

1. Розчини: склад, будова та класифікація

Мета лекції. Пояснити природу розчинів, способи вираження їхнього складу та послідовність переходів між масою, кількістю речовини й об'ємом під час простих технічних розрахунків.

План лекції

1. Поняття про розчини та механізм розчинення. 2. Розчинність і насичення. 3. Масова та мольна частки. 4. Молярна і моляльна концентрації. 5. Розбавлення та змішування. 6. Розрахунки складу технологічних розчинів.

1.1. Розчин і його компоненти

Розчин — однорідна система змінного складу, що містить два або більше компонентів. Речовину, яка зазвичай присутня у більшій кількості та визначає агрегатний стан системи, називають розчинником; інші компоненти — розчиненими речовинами. У водних розчинах розчинником є вода. Залежно від агрегатного стану розрізняють газоподібні, рідкі й тверді розчини. Металеві сплави можуть утворювати тверді розчини, хоча їхню будову докладніше розглядають у матеріалознавстві.

Водні розчини мають особливе значення в хімії та техніці: у них проводять численні реакції, готують допоміжні технологічні середовища, здійснюють очищення й промивання деталей. Для розрахунку складу використовують кількісні величини — масу, об'єм, кількість речовини, густину та різні способи вираження концентрації. Конкретний спосіб обирають за тим, які вихідні дані відомі та яке виробниче або навчальне завдання потрібно виконати.

1.2. Однорідність і розподіл речовини

В істинному розчині розчинена речовина розподілена на молекулярному або йонному рівні. Зовні такий розчин є однорідним, хоча його властивості змінюються зі складом і температурою. Суміш із великими твердими частинками, які осідають, не є істинним розчином: вона належить до дисперсних систем, наприклад суспензій. Аналогічно не слід ототожнювати емульсію з молекулярним розчином.

Поняття «концентрований» і «розведений» дають лише якісну характеристику. Щоб однозначно описати розчин, потрібно вказати числове значення частки або концентрації. Наприклад, два «розведені» розчини можуть істотно різнитися за вмістом речовини, а однакова масова частка не означає однакової молярної концентрації для сполук із різними молярними масами.

Джерела розділу: [1, с. 77–78]; [2, розд. «Розчини»].

2. Механізм розчинення, розчинність та насичення

2.1. Фізико-хімічна природа розчинення

Розчинення пов'язане з руйнуванням частини взаємодій між частинками речовини та виникненням нових взаємодій між розчиненою речовиною і розчинником. Для водних розчинів взаємодію частинок із молекулами води називають гідратацією, у загальному випадку — сольватацією. Ці явища визначають можливість розчинення й впливають на тепловий ефект процесу. Розчинення не обов'язково супроводжується нагріванням: залежно від природи речовини й умов теплота може як виділятися, так і поглинатися.

Під час розчинення йонного кристала полярні молекули води орієнтуються біля катіонів та аніонів. Унаслідок гідратації йони можуть переходити з кристала в розчин. Для молекулярних полярних речовин важливими є взаємодії між молекулами розчинника й розчиненої речовини; для деяких сполук розчинення супроводжується також хімічною реакцією з водою. Не кожна кристалічна йонна сполука легко розчиняється: істотне значення має співвідношення енергій руйнування ґратки та взаємодії з водою.

2.2. Насичені, ненасичені та пересичені розчини

Розчинність відображає максимальну кількість речовини, яка за заданих умов може перебувати в розчині у стані рівноваги з нерозчиненою фазою. Ненасичений розчин здатний розчинити додаткову кількість цієї речовини, насичений перебуває в рівновазі з надлишком, а пересичений містить більше розчиненої речовини, ніж відповідає рівноважній розчинності за тих самих умов, і може бути нестійким.

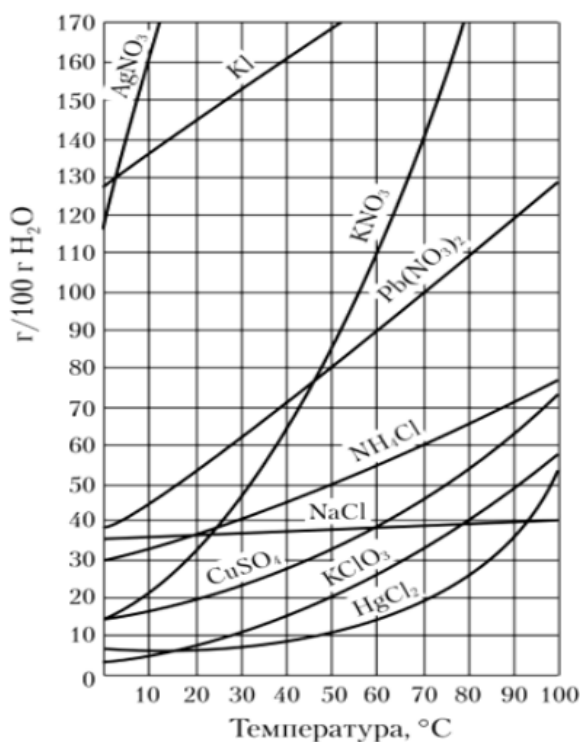


Рис. 4.1. Криві розчинності деяких твердих речовин у воді

Для багатьох твердих речовин розчинність із підвищенням температури зростає, проте це не універсальне правило. Вплив температури для конкретної речовини встановлюють за експериментальними даними або графіком. Для газів у воді за багатьох умов підвищення температури зменшує розчинність, тоді як збільшення парціального тиску газу, як правило, сприяє її зростанню. Розчинність потрібно відрізняти від швидкості розчинення: перемішування прискорює встановлення рівноваги, але за незмінних умов не обов'язково змінює граничну розчинність.

Джерела розділу: [1, с. 77–80]; [2, розд. «Розчини», графік розчинності].

3. Масова частка розчиненої речовини

3.1. Визначення масової частки

Масова частка розчиненої речовини — відношення її маси до загальної маси розчину. Цю величину позначають ω або w та виражають часткою одиниці чи у відсотках. Загальна маса розчину дорівнює сумі мас усіх його компонентів. Якщо розчин складається тільки з води й однієї розчиненої речовини, для обчислення маси води достатньо від маси розчину відняти масу речовини. Під час запису розрахунку потрібно чітко розрізняти масу речовини та масу всього розчину.

$$w = m(\text{речовини}) / m(\text{розчину}) \quad (4.1)$$

$$w, \% = w \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

$$m(\text{розчину}) = m(\text{речовини}) + m(\text{розчинника}) \quad (4.3)$$

3.2. Зворотні розрахунки

Якщо масова частка й загальна маса розчину відомі, масу розчиненої речовини знаходять множенням цих величин. Наприклад, у 200 г 10%-го водного розчину міститься 20 г розчиненої речовини й 180 г води. Важливо, що 10% під час підстановки у формулу перетворюють на 0,10. У разі використання різних одиниць маси спочатку потрібно перевести їх до однієї системи.

$$m(\text{речовини}) = w \cdot m(\text{розчину}) \quad (4.4)$$

Масова частка не залежить від способу подання маси: можна працювати з грамами, кілограмами або іншими одиницями за умови їхньої узгодженості. Якщо в технологічному описі наведено густину, з неї можна знайти масу заданого об'єму розчину. Але для цього густина має відповідати саме концентрації та температурі розчину, з яким виконують обчислення.

$$m(\text{розчину}) = \rho \cdot V(\text{розчину}) \quad (4.5)$$

Масові частки компонентів багатокомпонентного розчину в сумі дорівнюють одиниці, якщо враховано всі його складові. Це дає простий засіб перевірки правильності розрахунків: після визначення часток розчинених речовин частка води має бути різницею між одиницею та сумою решти часток.

$$\Sigma w_i = 1 \quad (4.6)$$

У завданнях на приготування розчинів масову частку використовують як основу матеріального балансу. Саме відомості про необхідну масу активної речовини дозволяють далі визначити масу вихідного концентрату, води та загальну масу готового продукту. Для речовин, які поглинають воду з повітря або утворюють кристалогідрати, до розрахунку вводять фактичний склад використововуваного реагенту.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»]. [4, розд. про розчини]

4. Мольна частка і молярна концентрація

4.1. Мольна частка

Мольна частка компонента дорівнює відношенню кількості речовини цього компонента до сумарної кількості речовини всіх компонентів розчину. На відміну від масової частки, тут порівнюють молі, а не грами. Для двокомпонентного розчину мольні частки розчинника та розчиненої речовини в сумі дорівнюють одиниці. Цю характеристику часто використовують для опису фізико-хімічних властивостей розчинів.

$$x_i = n_i / \Sigma n_i \quad (4.7)$$

$$\Sigma x_i = 1 \quad (4.8)$$

4.2. Молярна концентрація

Молярна концентрація C показує, скільки молів розчиненої речовини міститься в одному літрі розчину. Її одиниця — моль/л. Під час підготовки навчального розчину за відомими концентрацією й кінцевим об'ємом спочатку обчислюють кількість речовини, а потім — масу реагенту за його молярною масою. При цьому об'єм у формулі виражають у літрах; величину у мілілітрах необхідно поділити на 1000.

$$C = n / V(\text{розчину}) \quad (4.9)$$

$$m(\text{речовини}) = C \cdot V(\text{розчину}) \cdot M \quad (4.10)$$

Наприклад, для одержання 1,0 л розчину NaCl з молярною концентрацією 0,10 моль/л потрібно взяти 0,10 моль солі, що за молярної маси приблизно 58,5 г/моль відповідає 5,85 г. Далі речовину розчиняють і доводять об'єм розчину до заданого значення. Важливо: літр готового розчину і літр води — не тотожні об'єми, оскільки після розчинення загальний об'єм може змінитися.

Таблиця 4.1. Порівняння основних способів вираження складу

Величина	Що порівнюють	Одиниця
Масова частка w	Маса компонента / маса розчину	Частка або %
Мольна частка x	Молі компонента / сумарні молі	Частка одиниці

Величина	Що порівнюють	Одиниця
Молярна концентрація C	Молі речовини / об'єм розчину	моль/л
Моляльність b	Молі речовини / маса розчинника	моль/кг

На відміну від масової частки, молярна концентрація залежить від температури через зміну об'єму розчину. Тому під час точних вимірювань і порівнянь слід враховувати температуру; для простих навчальних задач вона задається або її впливом нехтують за умовою. Поняття молярної концентрації необхідне для розрахунку реакцій у розчинах та нейтралізації.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [3, розд. 7].

5. Моляльність, густина та переходи між характеристиками

5.1. Моляльна концентрація (моляльність)

Моляльність b — це кількість молів розчиненої речовини на один кілограм розчинника. Її не слід плутати з молярною концентрацією: у знаменнику молярності — об'єм усього розчину в літрах, а у знаменнику моляльності — маса саме розчинника в кілограмах. Моляльність не залежить безпосередньо від теплового розширення об'єму, тому її зручно використовувати під час опису деяких властивостей розчинів.

$$b = n(\text{речовини}) / m(\text{розчинника, кг}) \quad (4.11)$$

Наприклад, якщо в 1 кг води розчинено 0,5 моль речовини, моляльність становить 0,5 моль/кг. У навчальних завданнях обчислення моляльності починають із визначення маси води, а не маси розчину. Якщо задано масову частку, масу води знаходять із різниці загальної маси розчину та маси розчиненої речовини.

5.2. Зв'язок масової частки, густини та молярності

За відомими масовою часткою w , густиною ρ та молярною масою M можна перейти до молярної концентрації. Спершу визначають масу одного літра розчину за його густиною, потім обчислюють масу речовини в цьому літрі і ділять її на молярну масу. Якщо густина задана в г/мл, маса одного літра розчину становить 1000ρ грамів. Отже, формула перерахунку потребує узгоджених одиниць.

$$C = 1000 \cdot \rho \cdot w / M \quad (4.12)$$

Тут C — у моль/л, ρ — у г/мл, w — частка одиниці, M — у г/моль. Якщо замість частки задано масовий відсоток, його потрібно попередньо поділити на 100. Наприклад, для 10%-го розчину речовини з відомими густиною та молярною масою обчислення починають із $w = 0,10$; підстановка числа 10 замість 0,10 створила б стократну помилку.

Зворотне обчислення масової частки проводять за відомими C , M і ρ . Воно є корисним, коли в навчальному завданні одна частина вихідних даних задана як молярність, а інша — як

масова частка. Однак для реального розчину густина сама може залежати від концентрації, тому в точних задачах використовують відповідні експериментальні таблиці.

$$w = C \cdot M / (1000 \cdot \rho) \quad (4.13)$$

Для розв'язування практичних задач студент має спочатку записати, які величини відомі, перевірити одиниці і лише тоді обирати формулу. Цей простий порядок запобігає механічному змішуванню маси розчину та маси води або використанню мілілітрів у формулі, що вимагає літрів.

Джерела розділу: [2, розд. «Розчини»]; [3, розд. 7]. [5, розд. «Розчини»]

6. Розбавлення розчинів і матеріальний баланс

6.1. Розбавлення водою

Під час розбавлення до розчину додають розчинник. Якщо розчинена речовина не втрачається, її маса до та після розбавлення залишається однаковою. Це дозволяє знайти невідомі маси без жодних складних фізико-хімічних моделей. Позначивши масові частки початкового й кінцевого розчинів як w_1 і w_2 , а їхні маси як m_1 і m_2 , дістанемо основне рівняння матеріального балансу.

$$w_1 \cdot m_1 = w_2 \cdot m_2 \quad (4.14)$$

$$m(\text{доданої води}) = m_2 - m_1 \quad (4.15)$$

Наприклад, із 200 г 10%-го розчину потрібно одержати 5%-й. Початковий розчин містить 20 г речовини. Для отримання 5%-го розчину кінцева маса має становити 400 г, отже, потрібно додати 200 г води. Під час розбавлення масова частка зменшується, але маса розчиненої речовини не змінюється. Перевірка: 20 г із 400 г — це 0,05, або 5%.

6.2. Розбавлення за молярною концентрацією

Якщо об'єм початкового розчину та його молярна концентрація відомі, кількість речовини становить $n = C_1 V_1$. Після додавання розчинника за відсутності реакції та втрат молей речовини зберігаються, тому $C_1 V_1 = C_2 V_2$. У цій формулі об'єми повинні бути в однакових одиницях, а концентрації — у моль/л. Важливо, що розраховують потрібний кінцевий об'єм розчину, а не просто об'єм води для доливання.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (4.16)$$

Якщо потрібно приготувати розчин із концентрату, послідовність дій така: обчислюють кількість або масу цільової речовини, визначають необхідну кількість концентрату й після цього одержують заданий кінцевий об'єм. Формула $C_1 V_1 = C_2 V_2$ не описує змішування двох реагентів, які вступають у хімічну реакцію; у такому випадку спочатку складають рівняння реакції та матеріальний баланс.

Під час використання масових часток завжди працюють із масами; під час розведення за молярністю — з кількостями речовини та об'ємами готових розчинів. Перехід між цими

способами можливий лише за наявності додаткових відомостей, зокрема густини та молярної маси.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»].

7. Змішування розчинів різної концентрації

7.1. Баланс розчиненої речовини

Під час змішування двох розчинів однієї й тієї самої речовини без хімічної реакції маса цієї речовини в кінцевому розчині дорівнює сумі її мас в обох вихідних розчинах. Загальна маса кінцевого розчину дорівнює сумі мас вихідних розчинів за відсутності втрат. Звідси одержують формулу масової частки суміші. Ця формула придатна незалежно від того, чи додають до концентрованого розчину воду, чи змішують два розчини з різним вмістом речовини.

$$w(\text{суміші}) = (w_1 m_1 + w_2 m_2) / (m_1 + m_2) \quad (4.17)$$

Наприклад, змішали 100 г 10%-го розчину та 200 г 20%-го розчину однієї речовини. Маса речовини в першій порції — 10 г, у другій — 40 г. Разом у 300 г отриманого розчину міститься 50 г речовини. Кінцева масова частка становить приблизно 16,7%. Результат лежить між вихідними концентраціями — це додаткова перевірка правдоподібності.

7.2. Перевірка умов задачі

У розрахунку сумішей треба звертати увагу на агрегатний стан і хімічну сумісність компонентів. Якщо в процесі змішування утворюється осад, виділяється газ або відбувається інша реакція, просте додавання мас розчиненої речовини вже не описує фактичний кінцевий склад. Аналогічно для сумішей із випаровуванням або іншими втратами до балансу вводять відповідні додаткові члени.

Часто під час підготовки розчину використовують концентрат, у якому активна речовина становить лише частину маси. У цьому випадку спочатку знаходять потрібну масу активної речовини, далі визначають масу концентрату за відомою часткою речовини в ньому. Для остаточного розчину потрібно врахувати всі компоненти, включно з водою, яка вже містилася у концентраті.

$$m(\text{концентрату}) = m(\text{активної речовини}) / w(\text{концентрату}) \quad (4.18)$$

Прості масові баланси використовують у різних виробничих ситуаціях — від приготування мийного розчину до коригування концентрації технічної рідини. В навчальній задачі вихідні дані слід підбирати так, щоб студент міг окремо перевірити масу активної речовини, масу води й масу кінцевої суміші.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»].

8. Узагальнена послідовність розрахунку складу розчину

8.1. Алгоритм вибору величини та формули

Насамперед з умови визначають, що саме потрібно знайти: масу реагенту, масу розчинника, об'єм готового розчину, молярну концентрацію або масову частку. Якщо задані маси, зручним початком є масовий баланс; якщо задані молі й об'єм готового розчину, — молярна концентрація; якщо потрібно зіставити кількість речовини та масу розчинника, — молярність. В одній задачі можуть послідовно використовуватися декілька способів вираження складу, але їхні знаменники необхідно весь час розрізняти.

Для прикладу уявімо підготовку заданої маси водного робочого розчину з концентрату. Спершу за необхідною масовою часткою знаходять масу активної речовини; далі за її вмістом у концентраті — потрібну масу концентрату; потім за загальною масою готового розчину — масу води, яку слід додати. Якщо умова потребує молярності й містить густину, масу готового розчину переводять в об'єм та обчислюють молі активної речовини.

Перевіряють результати зворотною підстановкою. Сума мас концентрату та долитої води повинна дорівнювати заданій загальній масі, а маса активної речовини, поділена на масу розчину, — заданій масовій частці. Для молярної концентрації перевіряють, чи отримано число молів на літр готового розчину, а не на літр окремо взятої води.

Під час роботи з технічними розчинами отримані навчальні обчислення не замінюють відомостей про хімічну сумісність реагентів, тепловиділення та інші умови безпечного приготування. У цій лекції розглянуто саме кількісні характеристики, тоді як електролітична дисоціація, кислотно-основні взаємодії й рН є темою наступної лекції.

Питання для самоперевірки

1. Чим істинний розчин відрізняється від суспензії?
2. Чим насичений розчин відрізняється від ненасиченого?
3. У чому відмінність між масовою часткою, молярністю та молярністю?
4. Чому не можна прирівнювати літр води до літра готового розчину?
5. Яка величина зберігається під час звичайного розбавлення без реакції?
6. Які вихідні дані потрібні для перерахунку масової частки в молярну концентрацію?

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6.
- [2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділ «Розчини».
- [3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділ 7 «Розчини».
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: розчини.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ «Розчини».

ТЕМА 5

ЕЛЕКТРОЛІТИ, КИСЛОТНО-ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА pH ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

1. Електроліти та хімічні процеси у водних розчинах

Мета лекції. Пояснити електролітичну дисоціацію та кислотно-основні реакції, навчитися розрізняти сильні й слабкі електроліти та виконувати прості розрахунки водневого показника й нейтралізації.

План лекції

1. Електроліти та неелектроліти. 2. Механізм і ступінь дисоціації. 3. Кислоти, основи та йонні реакції. 4. Йонний добуток води й водневий показник. 5. Індикатори. 6. Гідроліз солей. 7. Застосування pH у навчальних прикладах технологічних середовищ.

1.1. Що таке електроліти

Електроліти — речовини, водні розчини або розплави яких проводять електричний струм завдяки руху йонів. До них належать багато кислот, основ і солей. Неелектроліти під час розчинення не створюють достатньої кількості вільних йонів, щоб забезпечити характерну для електролітів йонну провідність; типовий приклад — розчин сахарози у воді. Електропровідність залежить також від концентрації, температури й рухливості йонів, тому однакові за масовою часткою розчини різних солей можуть проводити струм по-різному.

У твердому кристалі NaCl йони займають відносно фіксовані положення у ґратці, тому вільного перенесення заряду немає. Після розплавлення або розчинення у воді йони стають рухливими й можуть переміщуватися під дією електричного поля. У розчині молекулярного неелектроліту частинки, навпаки, переважно залишаються електронейтральними молекулами. Ця відмінність лежить в основі навчального поділу розчинів.

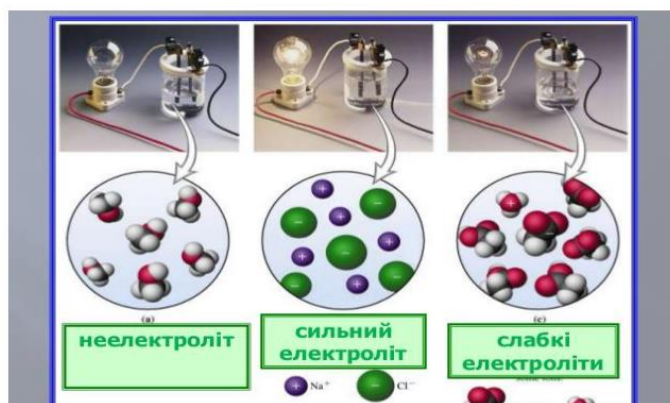


Рис. 5.1. Порівняння розчинів електролітів та неелектролітів

Поняття електролітичної дисоціації необхідне для пояснення хімічних реакцій у водних розчинах: молекулярне рівняння не завжди відображає, які частинки безпосередньо взаємодіють. Наприклад, під час нейтралізації розведених розчинів сильної кислоти й сильного лугу основною реакцією є взаємодія йонів Гідрогену та гідроксид-іонів з

утворенням води. Інші йони, якщо вони не беруть безпосередньої участі в реакції, залишаються у розчині.

Джерела розділу: [1, с. 85–87]; [3, розд. 8].

2. Механізм електролітичної дисоціації

2.1. Дисоціація йонних і полярних сполук

Під час розчинення кристалічної солі полярні молекули води орієнтуються біля її катіонів і аніонів. Взаємодія молекул води з йонами послаблює притягання йонів у кристалі й сприяє переходу частинок у розчин. Кожний йон оточується гідратною оболонкою; саме гідратовані йони є переносниками електричного заряду в розчині. Сольватація в інших розчинниках підпорядковується подібним загальним принципам, але її ефективність залежить від властивостей розчинника.

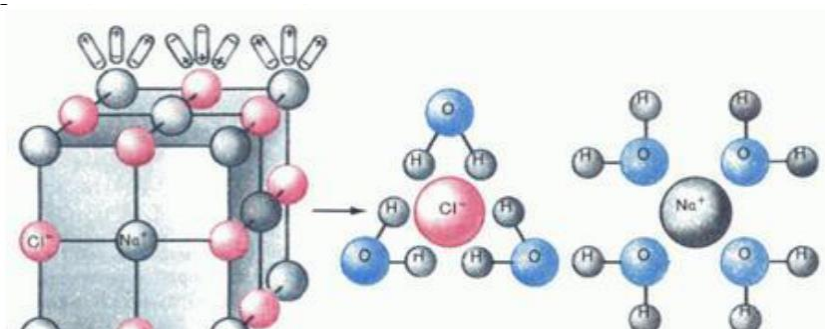


Рис. 5.2. Схема гідратації йонів у водному розчині

Для полярних молекулярних електролітів унаслідок взаємодії з водою можуть утворюватися йони. Зокрема, хлороводень, потрапляючи у воду, передає протон молекулі H_2O ; точнішим записом є утворення гідроній-іона H_3O^+ . У багатьох початкових розрахунках для стислості використовують $\text{H}^+(\text{водн.})$, розуміючи його як умовне позначення гідратованого протона, а не окремого «голого» йона в розчині.



Реакцію дисоціації сильної солі в навчальному записі можна подати стрілкою вправо: $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. Для слабкої кислоти, наприклад етанової (оцтової), між недисоційованими молекулами та йонами встановлюється рівновага. Саме тому її формулу дисоціації записують оборотною стрілкою. Кількість йонів у розчині залежить від природи речовини, концентрації, температури й властивостей розчинника.



Кількість катіонів і аніонів, що виникають під час дисоціації, визначають індексами у хімічній формулі та зарядом йонів. Наприклад, формульна одиниця кальцій хлориду дає один Ca^{2+} та два Cl^- . Сумарний позитивний і негативний заряд у розчині врівноважуються, що є додатковою перевіркою правильності записаного рівняння.



Джерела розділу: [1, с. 85–88]; [2, розд. «Електролітична дисоціація»]. [4, розд. про дисоціацію]

3. Сильні та слабкі електроліти

3.1. Ступінь дисоціації

Електроліти поділяють за ступенем дисоціації на сильні й слабкі. Сильні електроліти в розведених водних розчинах у навчальній моделі розглядають як практично повністю дисоційовані; слабкі дисоціюють частково. Ступінь дисоціації α — це відношення кількості частинок, які розпалися на йони, до початкової кількості відповідних частинок речовини. Його записують як частку одиниці або у відсотках.

$$\alpha = n(\text{дисоційованих частинок}) / n(\text{початкових частинок}) \quad (5.4)$$

$$\alpha, \% = \alpha \cdot 100 \% \quad (5.5)$$

Наприклад, якщо зі 100 умовних молекул слабкої кислоти на йони розпалися 5, ступінь дисоціації в такій спрощеній моделі становить 0,05, або 5%. Для сильних електролітів реальні концентровані розчини можуть відхилятися від ідеальної моделі через міжйонні взаємодії; тому висновок «ступінь дисоціації близький до одиниці» не означає, що для будь-якої концентрації можна без похибки замінити активності йонів їхніми молярними концентраціями.

3.2. Приклади груп електролітів

Таблиця 5.1. Навчальна класифікація електролітів

Група	Приклади	Характеристика
Сильні кислоти	HCl, HNO ₃	У розведеній воді практично повна дисоціація
Сильні основи	NaOH, KOH	Дають гідроксид-іони
Більшість розчинних солей	NaCl, KNO ₃	У воді утворюють катіони й аніони
Слабкі кислоти	CH ₃ COOH, H ₂ CO ₃	Часткова дисоціація
Слабкі основи	Водний розчин аміаку	Часткове утворення OH ⁻

У розчині слабкої кислоти існують і молекули кислоти, і утворені йони. Для простого однопротонного електроліту рівновага описується константою кислотної дисоціації K_a . На рівні ФМБ достатньо знати фізичний зміст константи: за заданої температури вона характеризує схильність кислоти до дисоціації. Розрахунки кислотно-основної рівноваги для багатокомпонентних розчинів виходять за межі цієї теми.

$$K_a = [H^+] \cdot [A^-] / [HA] \quad (5.6)$$

Зі зменшенням початкової концентрації слабого електроліту ступінь його дисоціації зазвичай зростає. Проте загальна концентрація розчинених частинок одночасно може

зменшуватися. Тому не можна ототожнювати високий ступінь дисоціації з високою загальною концентрацією йонів. Ці відмінності важливі для подальшого пояснення електропровідності та кислотності розчинів.

Джерела розділу: [1, с. 86–89]; [2, розд. «Електролітична дисоціація»].

4. Кисотно-основні реакції та нейтралізація

4.1. Кислоти й основи у водному розчині

У початковій теорії електролітичної дисоціації кислоти характеризують як речовини, які під час дисоціації утворюють у воді йони Гідрогену, а основи — як речовини, які утворюють гідроксид-іони. Для реакцій у водному середовищі корисно розглядати перенесення протона від кислоти до основи. У будь-якому випадку рівняння необхідно записувати з урахуванням фактичних частинок, присутніх у розчині, і умов конкретної реакції.

Для сильних кислоти й основи прикладом є взаємодія HCl з NaOH. У молекулярній формі рівняння показує утворення натрій хлориду та води. У повному йонному рівнянні Na^+ і Cl^- присутні в обох частинах, тому після скорочення залишається сутність нейтралізації — взаємодія $\text{H}^+(\text{водн.})$ з OH^- . Вода є слабким електролітом, тому її не розкладають на йони в скороченому йонному рівнянні.

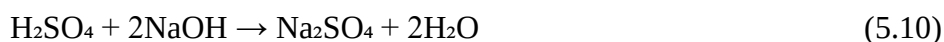


4.2. Стехіометрія нейтралізації

Розрахунок необхідної кількості лугу для нейтралізації починають із рівняння реакції, оскільки коефіцієнти залежать від основності кислоти та кількості гідроксильних груп основи. Для однопротонної кислоти HCl і однокислотної основи NaOH співвідношення молей становить 1:1. Якщо задані молярні концентрації й об'єми їхніх розчинів, то в точці стехіометричної нейтралізації кількості молей мають бути рівними.

$$C(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl}) = C(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH}) \quad (5.9)$$

Для сульфатної кислоти рівняння повної нейтралізації має інші коефіцієнти: один моль H_2SO_4 відповідає двом молям NaOH. Тому в найпростішому випадку на один моль кислоти потрібно два молі лугу. Формулу для кислоти й лугу з одиничним співвідношенням не можна механічно застосовувати до всіх кислотно-основних реакцій без перевірки рівняння.



У разі повної нейтралізації сильних кислоти й основи в достатньо розведеному розчині за температури близько 25 °C рН зазвичай близький до 7. Проте для солей слабких кислот або слабких основ можливий гідроліз, через що середовище після формальної нейтралізації може бути кислим або лужним. Це стане зрозумілим після розгляду йонного добутку води та гідролізу солей.

Джерела розділу: [1, с. 85–91]; [3, розд. 8].

5. Йонний добуток води та показник рН

5.1. Дисоціація води

Вода є дуже слабким електролітом: невелика частина її молекул бере участь у рівноважному утворенні гідроній-іонів та гідроксид-іонів. За температури 25 °С у чистій воді молярні концентрації $\text{H}^+(\text{водн.})$ та OH^- однакові й становлять приблизно 10^{-7} моль/л у початковому наближенні. Добуток цих концентрацій називають йонним добутком води. Для реальних концентрованих розчинів точніші обчислення ведуть через активності, але в базових навчальних задачах користуються концентраційною моделлю.

$$K_v = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] \approx 1,0 \cdot 10^{-14} \quad (25 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (5.11)$$

5.2. Водневий показник рН

Щоб не записувати дуже малі концентрації катіонів Гідрогену з багатьма нулями, використовують водневий показник рН. У спрощеній навчальній моделі рН дорівнює від'ємному десятковому логарифму молярної концентрації H^+ . Для точного фізико-хімічного опису рН пов'язують з активністю йонів, однак для достатньо розведених розчинів сильної кислоти та сильного лугу початковий розрахунок через концентрації є прийнятним.

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] \quad (5.12)$$

Якщо концентрація катіонів Гідрогену становить 10^{-3} моль/л, рН у цій моделі дорівнює 3. Чим більшою є концентрація H^+ , тим меншим є рН. За температури 25 °С для нейтрального водного розчину рН близький до 7, для кислого — нижчий за 7, для лужного — вищий за 7. Межа нейтральності зміщується з температурою, оскільки йонний добуток води не є сталою для всіх температур.

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ моль/л} \quad (5.13)$$

5.3. Гідроксильний показник рОН

Аналогічно визначають рОН через концентрацію гідроксид-іонів. За температури 25 °С у розведеній водній системі сума рН і рОН дорівнює приблизно 14. Наприклад, якщо в навчальній задачі відома концентрація OH^- у водному розчині сильного лугу 10^{-2} моль/л, то рОН = 2, а рН = 12. При обчисленнях потрібно уважно розрізняти концентрацію лугу та концентрацію OH^- , якщо на одну формульну одиницю припадає більше ніж одна гідроксильна група.

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] \quad (5.14)$$

$$\text{pH} + \text{pOH} \approx 14 \quad (25 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (5.15)$$

Джерела розділу: [1, с. 88–90]; [3, розд. 9]. [5, розд. про електроліти]

6. Індикатори та якісне визначення кислотності

6.1. Кислотно-основні індикатори

Індикатори — речовини, забарвлення яких змінюється залежно від кислотності середовища. Завдяки цьому вони дозволяють отримати якісну або орієнтовну оцінку рН. Приклади поширених індикаторів — лакмус, метилоранж та фенолфталеїн. Для кожного індикатора існує власний інтервал переходу забарвлення, тому один і той самий розчин може мати різне забарвлення залежно від використаного індикатора.

Зміна забарвлення індикаторів у розчинах кислот і лугів			
Індикатори	Колір індикатора в середовищі		
	нейтральному	кислому	лужному
ЛАКМУС	Фіолетовий	Червоний	Синій
ФЕНОЛ-ФТАЛЕЇН	Безбарвний	Безбарвний	Малиновий
МЕТИЛОВИЙ ОРАНЖЕВИЙ	Оранжевий	Рожевий	Жовтий

Рис. 5.3. Забарвлення найпоширеніших індикаторів у кислому, нейтральному та лужному середовищах

Лакмус у кислому середовищі має червоне, а в лужному — синє забарвлення; поблизу нейтрального середовища — проміжне фіолетове. Фенолфталеїн у кислому й близькому до нейтрального середовищі безбарвний, а в досить лужному набуває малинового забарвлення. Метилоранж переходить від червонуватого забарвлення в кислому середовищі до жовтого в менш кислому й лужному. Для точного визначення рН застосовують відповідні вимірювальні засоби, а не тільки оцінку кольору.

6.2. Кислотність технологічних середовищ

Показник рН допомагає контролювати кислотно-основні характеристики промивних, мийних та інших робочих водних середовищ. У виробничих умовах його вплив залежить від конкретного матеріалу, домішок, температури та складу розчину. Тому сам по собі рН не визначає повністю агресивність рідини, швидкість корозії металу або придатність розчину до певної технологічної операції.

Для навчального прикладу можна розглянути контроль якості розчину після умовного процесу нейтралізації. Якщо відомі початкова концентрація та об'єм сильної кислоти, розраховують стехіометричну потребу в лузі за рівнянням реакції. Після цього оцінюють, яке середовище очікується за відсутності надлишку реагентів у спрощеній моделі. Фактичний рН у технологічній системі перевіряють вимірюванням, оскільки можуть бути присутні інші кислотно-основні компоненти.

Забарвлення індикаторів застосовують насамперед для демонстрації та попереднього розрізнення середовищ. Якщо потрібно визначити конкретне числове значення рН або

контролювати відносно вузький діапазон, необхідні відповідна калібровка та інструментальне вимірювання.

Джерела розділу: [1, с. 52–53, 89–91]; [2, розд. про водневий показник].

7. Гідроліз солей і реакція середовища

7.1. Що називають гідролізом

Гідролізом солей у водних розчинах називають взаємодію їхніх йонів із водою, що приводить до встановлення нових кислотно-основних рівноваг. Якщо сіль утворена сильною кислотою та сильною основою, як NaCl, помітного гідролізу її йонів у звичайній навчальній моделі немає, і розчин має середовище, близьке до нейтрального. Якщо сіль містить йон, сполучений зі слабкою кислотою або слабкою основою, середовище може стати лужним або кислим.

Прикладом солі сильної основи та слабкої кислоти є Na₂CO₃. Карбонат-іон реагує з молекулою води, утворюючи гідрогенкарбонат-іон та OH⁻; унаслідок цього розчин має лужну реакцію. Сіль сильної кислоти та слабкої основи NH₄Cl здатна утворювати в розчині надлишок гідратованих йонів Гідрогену, тому середовище є кислим.



Таблиця 5.2. Приклади реакції середовища розчинів солей

Сіль	Походження	Очікуване середовище
NaCl	Сильна кислота + сильна основа	Близьке до нейтрального
NH ₄ Cl	Сильна кислота + слабка основа	Кисле
Na ₂ CO ₃	Слабка кислота + сильна основа	Лужне
CH ₃ COONa	Слабка кислота + сильна основа	Лужне

Для солей слабкої кислоти та слабкої основи рН залежить від співвідношення їхніх кислотно-основних характеристик. У межах цього конспекту достатньо вміти визначати якісний характер середовища для простих типових випадків. Розрахунок точного рН таких систем потребує констант рівноваги та додаткових наближень і не входить до базових завдань ФМБ.

Гідроліз пояснює, чому після розчинення різних солей у воді одержують неоднакову реакцію середовища, навіть коли самі солі не містять у формулі вільних H⁺ або OH⁻. Це важливо під час аналізу водних технічних середовищ і можливого впливу на стан металевих поверхонь.

Джерела розділу: [1, с. 90–91]; [2, розд. «Гідроліз солей»].

8. Узагальнений приклад кислотно-основного розрахунку

8.1. Від кількості реагенту до якісної оцінки pH

Розглянемо навчальну ситуацію: потрібно визначити, який об'єм розчину NaOH молярної концентрації 0,20 моль/л необхідний для повної нейтралізації 150 мл розчину HCl концентрації 0,10 моль/л. Реакція відбувається у співвідношенні 1:1. Кількість кислоти становить 0,015 моль, отже, така сама кількість лугу потрібна для стехіометричної нейтралізації. Шуканий об'єм лугу становить 0,075 л, або 75 мл.

$$n(\text{HCl}) = 0,10 \cdot 0,150 = 0,015 \text{ моль} \quad (5.18)$$

$$V(\text{NaOH}) = 0,015 / 0,20 = 0,075 \text{ л} \quad (5.19)$$

Цей приклад об'єднує знання про молярну концентрацію, урівнювання реакцій і дисоціацію сильних електролітів. У спрощеній моделі за точної нейтралізації сильної кислоти сильним лугом за температури 25 °C середовище буде близьким до нейтрального. Якщо лугу взято менше необхідної кількості, залишиться надлишок кислоти; якщо більше — надлишок лугу. Для обчислення pH такого залишку потрібно знати вже не початкові, а кінцеві концентрації після змішування.

Послідовність під час аналізу реального водного середовища ширша за простий стехіометричний розрахунок: потрібно враховувати інші розчинені речовини, можливий гідроліз, температуру та відповідність використаної навчальної моделі фактичним умовам. Тому для практичних робіт із хімії достатньо задач на прості однокомпонентні системи, а оцінювання конкретного промислового процесу не слід виконувати без додаткових вихідних даних.

Підсумок теми: електролітична дисоціація пояснює йонний склад водних розчинів; сила електроліту характеризує ступінь утворення йонів; pH кількісно описує кислотність у визначених умовах; гідроліз дає змогу передбачати реакцію середовища розчинів солей. Ці положення будуть використані під час практичних розрахунків концентрацій та нейтралізації.

Питання для самоперевірки

1. Чому розчин NaCl проводить струм, а розчин сахарози — практично ні?
2. Чим сильний електроліт відрізняється від слабого?
3. Що означає ступінь дисоціації?
4. Яке скорочене йонне рівняння відповідає нейтралізації сильної кислоти сильним лугом?
5. Який pH має розведений розчин сильної кислоти з $[\text{H}^+] = 10^{-4}$ моль/л?
6. Чому розчин Na_2CO_3 зазвичай має лужну реакцію?

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6, підрозділи 6.4–6.7.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи «Електролітична дисоціація», «Гідроліз солей».

[3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи 8–9.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: дисоціація та рН.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про електроліти та водні розчини.

ТЕМА 6

ЕНЕРГЕТИКА, ШВИДКІСТЬ ТА РІВНОВАГА ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1. Енергетика і перебіг хімічних процесів

Мета лекції. Пояснити, чому хімічні реакції супроводжуються поглинанням або виділенням енергії; розкрити зміст швидкості реакції, хімічної рівноваги та впливу умов на перебіг процесу.

План лекції

1. Енергія хімічних реакцій. 2. Тепловий ефект і закон Гесса. 3. Напрямок хімічних процесів. 4. Швидкість реакцій та чинники її зміни. 5. Каталіз. 6. Хімічна рівновага та принцип Ле Шательє. 7. Прості приклади для матеріалознавства.

1.1. Хімічна реакція як перетворення речовин та енергії

Під час хімічної реакції руйнуються одні хімічні зв'язки та утворюються інші. Енергетичні зміни залежать від співвідношення витрат енергії на розрив зв'язків і енергії, що виділяється під час їх утворення. Зовнішніми проявами можуть бути нагрівання, охолодження, світіння або утворення газу, але самі ці ознаки ще не дають кількісної характеристики реакції.

Термодинамічна система — частина середовища, яку умовно відокремлюють для дослідження. У відкритій системі можливий обмін і речовиною, і енергією; замкнута система обмінюється з оточенням енергією, але не речовиною; ізольована в ідеальній моделі не обмінюється ні тим, ні іншим. У реальних виробничих умовах абсолютно ізольовану систему майже неможливо створити.



Рис. 6.1. Схематичне порівняння відкритої, замкнутої та ізольованої систем

Для нагрітої металевої деталі важливий теплообмін із повітрям; для реакції у відкритому тиглі — також надходження кисню й вихід газоподібних продуктів. Під час розв'язування задач треба завжди з'ясувати, яка система розглядається та які види обміну враховуються.

У технічній хімії параметрами стану найчастіше служать температура, тиск, об'єм і концентрація. На відміну від кількості речовини чи загальної енергії, температура та тиск не

залежать від розміру однорідної системи; їх називають інтенсивними величинами. Маса й сумарний запас енергії змінюються разом із розміром системи та належать до екстенсивних характеристик. Ця різниця допомагає не плутати теплоту, виділену всією партією речовини, з питомими характеристиками окремої кількості реагенту.

Джерела розділу: [1, с. 62–64]; [2, розд. 4].

2. Тепловий ефект реакції і термохімічні рівняння

2.1. Екзотермічні та ендотермічні реакції

Екзотермічна реакція супроводжується передаванням теплоти в навколишнє середовище. Ендотермічна реакція за заданих умов потребує надходження теплоти. За сталого тиску та за відсутності інших видів роботи, крім роботи розширення тепловий ефект реакції пов'язують зі зміною ентальпії ΔH : для екзотермічної реакції $\Delta H < 0$, а для ендотермічної $\Delta H > 0$. Знак визначають з погляду системи, а не спостерігача.

$$\Delta H = H(\text{продуктів}) - H(\text{реагентів}) \quad (6.1)$$

Термохімічне рівняння записують разом з агрегатними станами речовин. Якщо згоряє певна кількість палива, тепловий ефект для іншої кількості знаходять пропорційно до кількості речовини, зазначеної у рівнянні. Не можна без уточнень переносити тепловий ефект реакції з утворенням водяної пари на таке саме рівняння з утворенням рідкої води.

2.2. Закон Гесса

За законом Гесса тепловий ефект перетворення залежить від початкового та кінцевого станів системи, а не від способу, яким система перейшла з одного стану в інший. Цей принцип дає змогу підсумовувати відомі термохімічні рівняння для визначення теплового ефекту реакції, яку складно дослідити безпосередньо.

$$\Delta H(\text{загальна}) = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n \quad (6.2)$$

Наприклад, якщо одна речовина послідовно перетворюється спочатку на проміжний продукт, а потім — на кінцевий, сумарна зміна ентальпії дорівнює сумі змін ентальпії обох стадій. У навчальних розрахунках важливо коректно множити тепловий ефект разом із коефіцієнтами рівняння, а під час обернення реакції — змінювати знак ΔH на протилежний.

Таблиця 6.1. Знаки теплових ефектів

Тип реакції	Зміна ентальпії	Енергетичний прояв
Екзотермічна	$\Delta H < 0$	Теплота віддається оточенню
Ендотермічна	$\Delta H > 0$	Теплота надходить до системи

Для коректного використання термохімічних даних обов'язково зіставляють коефіцієнти рівняння, агрегатні стани й одиниці вимірювання. Якщо тепловий ефект записано для утворення двох молів продукту, для одного моля за тих самих умов він буде удвічі меншим. Рівняння утворення оксиду під час нагрівання металу не дозволяє саме по

собі визначити фактичну температуру виробу: одночасно відбувається теплопередавання до металу, повітря та оснащення. У виробничій практиці тому розрізняють хімічний тепловий ефект і загальний тепловий баланс установки.

Джерела розділу: [1, с. 64–68]; [2, розд. 4]. [4, розд. про хімічну термодинаміку]

3. Енергетична можливість і фактична швидкість реакцій

3.1. Самочинність процесу

Навіть реакція з виділенням теплоти не завжди розпочинається негайно. Для оцінювання можливості самочинного перебігу за сталих температури й тиску застосовують зміну енергії Гіббса ΔG . Якщо $\Delta G < 0$, прямий напрям є термодинамічно можливим за заданих умов; за $\Delta G = 0$ встановлюється рівновага. Величина ΔG характеризує можливість і напрям процесу, але сама по собі не показує, скільки хвилин або років він триватиме.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (6.3)$$

Тут T — абсолютна температура, а ΔS — зміна ентропії. На рівні фахового молодшого бакалавра важливо розуміти значення складових формули, а не розв'язувати складні задачі з термодинамічних потенціалів. Температура може змінювати вигідність прямого й зворотного процесів, тому висновок завжди стосується конкретних умов.

3.2. Чому реакції відбуваються з різною швидкістю

Атоми або молекули повинні зіткнутися з достатньою енергією та відповідним взаємним розташуванням, щоб реакція відбулася. Енергію, необхідну для подолання початкового енергетичного бар'єра, називають енергією активації. Саме тому багато реакцій, які термодинамічно можливі, помітно прискорюються лише після нагрівання або введення каталізатора.

Для залізного виробу окиснення на вологому повітрі термодинамічно можливе, але його реальна швидкість залежить від вологості, стану поверхні й складу середовища. При нагріванні металу до високої температури можуть інтенсивно утворюватися оксиди. Отже, термодинамічна можливість, кінетична швидкість і фактичні виробничі умови — різні аспекти одного процесу.

При зіставленні двох технологічних процесів не варто робити висновок лише за знаком теплового ефекту: реакція з більшою кількістю виділеної теплоти не обов'язково перебігає швидше. Швидкість вивчає окремий розділ хімії — хімічна кінетика.

Інший аспект енергетики пов'язаний з ентропією: під час самочинного перебігу процесів у природі енергія не завжди повністю придатна для перетворення на корисну роботу. За високої температури роль члена $T \cdot \Delta S$ у рівнянні Гіббса може зростати. Це якісно пояснює, чому деякі високотемпературні процеси мають інший рівноважний стан, ніж аналогічні процеси за кімнатної температури. Однак розрахунок фактичного напрямку в

багатокомпонентній системі потребує довідкових термодинамічних даних, які не вводитимемо без джерел.

Джерела розділу: [2, розд. 4–5]; [3, розд. «Енергетика та кінетика»].

4. Швидкість хімічних реакцій

4.1. Середня швидкість

Швидкість гомогенної реакції характеризують зміною концентрації учасника процесу за одиницю часу. Концентрація реагенту зменшується, а продукту — зростає. Якщо за перебігом спостерігають за одним реагентом, перед відношенням зміни концентрації до часу ставлять знак мінус, щоб швидкість була додатною. Для різних речовин у тому самому рівнянні треба враховувати стехіометричні коефіцієнти.

$$v(\text{реагенту}) = -\Delta C / \Delta t \quad (6.4)$$

$$v(\text{продукту}) = +\Delta C / \Delta t \quad (6.5)$$

Одиницею середньої швидкості в навчальних задачах може бути моль/(л·с). На практиці швидкість твердих металів у реакції з газом чи розчином часто характеризують зміною маси або товщини шару за одиницю часу. Порівнювати швидкості, наведені в різних одиницях, без відповідного перерахунку не можна.

4.2. Концентрація, поверхня, температура

Збільшення концентрації реагентів часто підвищує число ефективних зіткнень між частинками. Зміна тиску відчутно впливає переважно на процеси за участю газів. Для реакції твердого металу з рідиною або газом важливі площа контакту, наявність оксидної плівки та перемішування. Металевий порошок має більшу питому поверхню, ніж масивний зразок тієї самої маси, тому може реагувати значно швидше.

Підвищення температури зазвичай збільшує частку частинок, які мають достатню енергію для подолання бар'єра активації. У спрощених навчальних задачах застосовують температурний коефіцієнт швидкості γ , що показує, у скільки разів швидкість змінюється при підвищенні температури на 10 °C у заданому інтервалі.

$$v_2 / v_1 = \gamma^{((t_2 - t_1) / 10)} \quad (6.6)$$

Температурний коефіцієнт не є універсальною сталою: його значення й застосовність залежать від конкретної реакції та температурного інтервалу.

Для реакцій між твердим металом і газом швидкість залежить також від утвореного шару продукту. Поки поверхня чиста, газ безпосередньо контактує з металом; після появи суцільного оксиду молекули газу або йони можуть проникати через шар значно повільніше. Отже, збільшення температури й площі поверхні не в усіх випадках приводить до однакового зростання швидкості. Для вивчення корозії та окалиноутворення важливо враховувати не лише зіткнення частинок, а й доступ реагенту до поверхні.

Джерела розділу: [1, с. 69–73]; [2, розд. 5]. [5, розд. про кінетику]

5. Енергія активації та каталіз

5.1. Енергетичний профіль реакції

Порівняння початкового стану, проміжного активованого стану та продуктів показує, чому для початку процесу потрібно подолати енергетичний бар'єр. Висота цього бар'єра відповідає енергії активації. На енергетичному профілі її відраховують від енергетичного рівня реагентів до вершини. Тепловий ефект реакції, навпаки, визначається різницею між рівнями реагентів і продуктів.

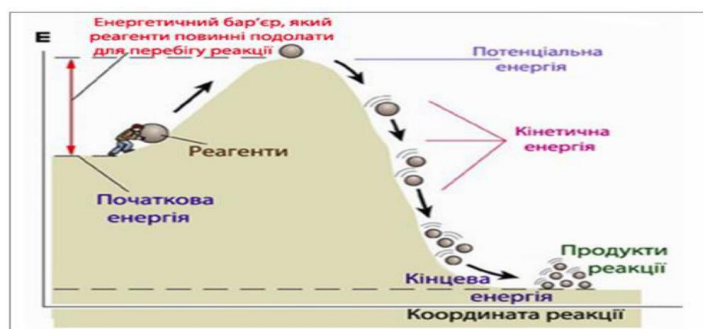


Рис. 6.2. Схема енергетичного профілю реакції та енергії активації

5.2. Каталізатор і його дія

Каталізатор змінює механізм перебігу реакції, забезпечуючи альтернативний шлях із меншою енергією активації. За однакових умов це може значно прискорювати процес. Каталізатор після завершення сумарної реакції відновлюється і не входить до стехіометричного рівняння як звичайний витратний реагент. У реальних системах можливе поступове отруєння або деактивація каталізатора.

Каталізатор не змінює термодинамічної рівноваги та загальної зміни енергії Гіббса реакції; він прискорює наближення до рівноваги. Це важливо: якщо задані температура й склад газової суміші, введення каталізатора не може довільно змістити рівноважний склад, хоча дозволяє швидше досягти його.

Таблиця 6.2. Порівняння двох способів прискорення

Зміна умови	Що насамперед змінюється	Важливе застереження
Нагрівання	Швидкість багатьох реакцій	Може змінити також рівноважний склад
Введення каталізатора	Шлях та швидкість реакції	Не змінює рівноважного положення

Для розрахункових вправ достатньо вміти порівнювати два профілі з різною висотою активаційного бар'єра та пояснювати, чому швидкість змінюється, не змінюючи рівняння сумарного хімічного перетворення.

Каталіз буває гомогенним, коли каталізатор і реагенти перебувають в одній фазі, та гетерогенним, коли реакція відбувається на поверхні іншої фази. Для гетерогенного каталізу

особливо важлива чистота поверхні: забруднення здатне блокувати активні центри. Ця відмінність пояснює, чому реальна швидкість каталізованого процесу залежить не лише від хімічної формули каталізатора, а й від його стану та площі поверхні. У межах цієї теми застосування каталізу розглядаємо як якісний приклад впливу механізму реакції на її швидкість.

Джерела розділу: [1, с. 72–74]; [2, розд. 5].

6. Хімічна рівновага

6.1. Оборотні реакції

Оборотна реакція за заданих умов може перебігати в прямому та зворотному напрямках. На початку змішування реагентів переважає прямий процес, але в міру накопичення продуктів швидкість зворотної реакції зростає. Коли ці швидкості стають рівними, встановлюється динамічна хімічна рівновага: обидві реакції тривають, проте макроскопічний склад системи більше не змінюється.



$$v(\text{прямої}) = v(\text{зворотної}) \quad (6.8)$$



Рис. 6.3. Зміна швидкостей прямої та зворотної реакцій до досягнення рівноваги

6.2. Константа рівноваги

За сталої температури співвідношення рівноважних концентрацій для простої оборотної реакції можна описати константою рівноваги. Для наведеної реакції утворення гідроген йодиду добуток концентрацій продукту в степені, що відповідає коефіцієнту, ділять на добуток концентрацій вихідних газів. Значення K залежить від температури і не змінюється лише через початкову кількість реагентів.

$$K_c = [\text{HI}]^2 / ([\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]) \quad (6.9)$$

У формулу підставляють саме рівноважні, а не початкові концентрації. Якщо до рівноважної суміші додати один із компонентів, виникає тимчасовий дисбаланс; після перебігу прямого або зворотного процесу встановлюється новий рівноважний склад за тієї самої температури.

Для гетерогенних процесів, у яких одночасно присутні тверді, рідкі та газоподібні фази, вирази констант рівноваги складніші. У курсі ФМБ достатньо розуміти зміст рівноваги та найпростіші концентраційні вирази для газових систем.

Коли кажуть, що реакція досягла рівноваги, це не означає, що всі реагенти повністю витрачені. У суміші можуть одночасно залишатися і вихідні речовини, і продукти, а їхнє співвідношення визначається константою рівноваги при заданій температурі. Якщо рівноважний склад змінено шляхом вилучення одного продукту, реакція може відновити його утворення. Саме тому поняття рівноваги є корисним для якісного обговорення газових реакцій у техніці, але без довідкових даних із нього не одержують точну масу кінцевого продукту.

Джерела розділу: [1, с. 74–76]; [2, розд. 6].

7. Зміщення рівноваги та принцип Ле Шательє

7.1. Вплив концентрації, тиску і температури

Якщо на систему в стані рівноваги діє зовнішня зміна умов, система зазвичай реагує в напрямі, який частково послаблює наслідки цієї зміни. Так формулюють принцип Ле Шательє. Збільшення концентрації реагенту часто зміщує рівновагу в бік його витрачання; вилучення продукту також може сприяти прямій реакції.

Підвищення тиску зміщує рівновагу газової системи в бік меншої кількості молів газу, якщо ця кількість неоднакова по обидва боки рівняння. Якщо число молів газу в прямому й зворотному напрямках однакове, ефект тиску може бути незначним у межах ідеальної моделі. Підвищення температури сприяє ендотермічному напрямку, а охолодження — екзотермічному.

Таблиця 6.3. Типові зміни рівноваги

Вплив	Очікуваний напрям зміщення
Додавання реагенту	У бік його споживання
Вилучення продукту	У бік утворення продукту
Підвищення температури	У бік ендотермічної реакції
Підвищення тиску в газовій системі	У бік меншої кількості молів газу

Принцип допомагає якісно передбачити зміни, але без констант рівноваги та вихідного складу він не дає точної кількості продукту. Каталізатор у цій таблиці не зазначений: він не зміщує хімічної рівноваги, а прискорює її встановлення.

Принцип Ле Шательє застосовують тільки після перевірки рівняння та характеру реакції. Наприклад, підвищення тиску не може однаково впливати на всі газові перетворення: якщо ліворуч і праворуч однакове число молів газів, просте правило про зміщення за тиском не дає ефекту. Для зміни температури потрібно знати, який напрям є ендотермічним. Якщо

теплота виділяється в прямому напрямі, нагрівання сприяє зворотній реакції, але одночасно може прискорювати встановлення нового рівноважного стану.

Джерела розділу: [1, с. 74–76]; [2, розд. 6].

8. Узагальнення для технічних процесів

8.1. Як застосувати матеріал при вивченні металів

Нагрівання сталеві заготовки, окиснення її поверхні та подальше охолодження ілюструють зв'язок трьох питань: енергетики реакцій, швидкості процесів та можливості утворення нових речовин. Тепловий ефект окиснення характеризує енергетичний бік; температура й площа поверхні впливають на швидкість; склад газового середовища визначає, які взаємодії можуть бути можливими.

У спрощеній навчальній вправі для реакції із заданим тепловим ефектом -120 кДж на 1 моль реагенту під час перетворення $0,25$ моль цього реагенту виділиться 30 кДж теплоти. Це умовні числові дані, запропоновані лише для тренування пропорційного розрахунку; вони не є довідковою характеристикою конкретного металу.

$$Q(\text{виділена}) = 0,25 \cdot 120 = 30 \text{ кДж} \quad (6.10)$$

Під час аналізу виробничого процесу така оцінка є лише першою стадією: реальна корисна теплота залежить від втрат, теплоємності конструкції та режиму нагрівання. У практичній роботі достатньо показати, як із термохімічного рівняння й кількості реагенту одержують теплову оцінку.

Питання для самоперевірки

1. Що відрізняє відкриту систему від закритої?
2. Як за знаком ΔH розпізнати екзотермічну реакцію?
3. Чому термодинамічна можливість не означає великої швидкості?
4. Як каталізатор впливає на енергію активації?
5. Що означає динамічна рівновага?
6. Як температура впливає на рівновагу екзотермічної реакції?

Корисно розділяти три питання в кожній розрахунковій задачі: чи можливе перетворення, з якою швидкістю воно може відбуватися та який остаточний склад є рівноважним. Для відповіді на перше потрібна термодинамічна інформація, на друге — кінетичні характеристики й умови контакту, на третє — рівноважні залежності. Сам по собі знак теплового ефекту не дає відповідей на всі три питання. Такий спосіб аналізу стане потрібним у темах про окиснення сплавів і хімічні процеси зварювальної ванни.

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 5, с. 60–

76.

[2] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–6.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Харків: ХНАДУ, 2023. Розд. про закономірності хімічних процесів.

[4] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи «Елементи хімічної термодинаміки», «Основи хімічної кінетики», «Хімічна рівновага».

[5] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: закономірності реакцій.

ТЕМА 7

ОКИСНО-ВІДНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

1. Окисно-відновні процеси як основа хімії металів

Мета лекції. Повторити правила визначення ступенів окиснення та складання електронного балансу; розглянути типові окисно-відновні реакції металів у водних розчинах і газових середовищах.

План лекції

1. Окиснення, відновлення, ступені окиснення. 2. Електронний баланс. 3. Реакції металів із киснем, водою, кислотами й солями. 4. Ряд активності металів. 5. Сполуки Феруму та амфотерні метали. 6. Пасивація й значення окиснення для техніки.

1.1. Електронна природа окиснення й відновлення

Окисно-відновними називають реакції, у яких змінюються ступені окиснення хоча б частини елементів. Процес віддавання електронів є окисненням, а приймання — відновленням. Відновник віддає електрони й сам окиснюється; окисник приймає електрони й сам відновлюється. У загальній реакції ці процеси відбуваються одночасно, адже електрони не можуть зникати або виникати без відповідної протилежної напівреакції.



Типовим прикладом є занурення цинкової пластини в розчин купрум(II) сульфату. Пластина поступово віддає йони Zn^{2+} у розчин, тоді як йони Cu^{2+} відновлюються і можуть осаджуватися на поверхні цинку. Це не просто обмін речовин: одночасно відбувається перенесення електронів від активнішого металу до йонів менш активного.



Під час вивчення електрохімії ми побачимо, що розділення напівреакцій у просторі дає можливість використовувати електронний потік у зовнішньому колі. У цій лекції насамперед важливо правильно розрізняти окисник і відновник та встановлювати зв'язок електронного балансу з коефіцієнтами рівняння.

Щоб визначити окисник і відновник у складній реакції, спочатку виписують формули реагентів та продуктів, після чого порівнюють ступені окиснення однакових елементів. Підвищення ступеня означає втрату електронів, а зниження — їх приєднання. Для йонних рівнянь важливо відрізняти заряд усього йона від формального ступеня окиснення окремого елемента в ньому. Такий порядок роботи допомагає уникнути поширеної помилки, коли електронний баланс складають за елементами, ступені окиснення яких узагалі не змінилися.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [2, розд. 10].

2. Ступені окиснення та електронний баланс

2.1. Визначення ступенів окиснення

Ступінь окиснення — формальний заряд атома в сполучі за умовного повного переходу спільних електронних пар до електронегативнішого атома. У простих речовинах ступінь окиснення дорівнює нулю. Флуор у сполуках переважно має -1 ; Гідроген із неметалами — $+1$; Оксиген здебільшого — -2 . Сума ступенів окиснення атомів електронейтральної сполуки дорівнює нулю, а для багатоатомного йона — його заряду.

Таблиця 7.1. Приклади ступенів окиснення

Речовина	Елемент	Ступінь окиснення
Fe	Fe	0
FeO	Fe	+2
Fe ₂ O ₃	Fe	+3
H ₂ SO ₄	S	+6
KMnO ₄	Mn	+7

2.2. Урівнювання простої реакції

Електронний баланс складають для атомів, ступені окиснення яких змінюються. Кількість відданих електронів має дорівнювати кількості прийнятих. Для взаємодії магнію з киснем Магній переходить зі ступеня 0 до +2, а Оксиген — із 0 до -2 . Оскільки молекула O₂ містить два атоми Оксигену, її повне відновлення потребує чотирьох електронів; їх віддають два атоми Магнію.



Коефіцієнти добирають не тільки за електронами, а й за законом збереження числа атомів кожного елемента. Особливо уважно перевіряють рівняння за участю оксигеновмісних кислот, води й складних йонів. Для першого етапу навчання достатньо балансувати прості реакції сполучення, заміщення та відновлення оксидів.

Окреме вміння — відрізнати реальну зміну ступеня окиснення від звичайного йонного обміну. Наприклад, під час взаємодії HCl і NaOH ступені окиснення елементів не змінюються, тому нейтралізація не є окисно-відновною реакцією.

У реакціях металів особливу увагу звертають на індекси в простих речовинах: молекула кисню складається з двох атомів Оксигену, тому приймання електронів потрібно обчислювати для всієї молекули. Визначивши множники електронного балансу, добирають коефіцієнти до інших речовин і лише потім остаточно перевіряють кількість усіх атомів.

Якщо реакція відбувається в кислому або лужному розчині, до розрахунку можуть входити йони H^+ , OH^- та молекули H_2O , однак на початковому етапі достатньо спершу опанувати прості молекулярні рівняння.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [3, розд. «Окисно-відновні процеси»]. [4, розд. про окисно-відновні реакції]

3. Окиснення металів у газових середовищах

3.1. Взаємодія з киснем

Під час нагрівання багато металів активно реагують з киснем, утворюючи оксиди. Вид оксиду залежить від природи металу, температури та доступу кисню. Для активних металів реакція може перебігати інтенсивно; для деяких конструкційних металів на поверхні формується щільна оксидна плівка, яка сповільнює подальшу взаємодію. Утворення оксиду є окисно-відновним процесом, оскільки метал підвищує ступінь окиснення, а Оксиген знижує його.



У сталях найважливішим металевим компонентом є залізо. За різних умов воно утворює оксиди FeO , Fe_3O_4 та Fe_2O_3 . Їхнє співвідношення на поверхні нагрітого виробу залежить від температури та складу газової атмосфери. Не слід припускати, що оксидна плівка на всіх металах однаково добре захищає поверхню: її захисна дія залежить від суцільності, здатності до розтріскування та зчеплення з металом.



У газових процесах склад атмосфери суттєвий: за нестачі кисню можуть зростати частки нижчих оксидів, а за наявності водяної пари або інших реакційно здатних компонентів можливі додаткові перетворення. Для базової хімії важливо розуміти зв'язок складу оксидного продукту зі ступенями окиснення металу.

3.2. Відновлення оксидів металів

Метали можна одержувати шляхом відновлення їхніх сполук. У спрощеному рівнянні відновлення оксиду заліза карбон(II) оксидом Ферум змінює ступінь окиснення з +3 до 0, а Карбон у складі CO — з +2 до +4. Таку реакцію розглядають як базовий хімічний принцип металургійних процесів, а не як повний опис промислового агрегату.



У високотемпературних процесах важливий не лише факт окиснення, а й поведінка оксидної плівки. Якщо вона суцільна, міцно тримається на поверхні й уповільнює надходження кисню, подальша реакція може сповільнюватися. Якщо шар пористий або відшаровується, свіжа поверхня знову контактує з окисником. Тому спостереження

утворення оксидів не дозволяє автоматично робити висновок про захист металу. Для якісної оцінки враховують також температурні деформації та хімічну природу продуктів окиснення.

Джерела розділу: [1, с. 108–110, 114–115]; [3, розд. про сполуки Феруму].

4. Хімічна активність і ряд напруг металів

4.1. Метали у воді та розчинах кислот

Метали відрізняються здатністю віддавати електрони. Ряд електрохімічної активності розташовує метали за стандартними електродними потенціалами, проте фактична реакційна здатність у конкретному розчині залежить також від складу середовища та стану поверхні. Частина активних металів реагує з водою за звичайних умов; магній інтенсивніше взаємодіє з гарячою водою або паром; залізо зазвичай не виділяє водень із холодної чистої води помітною швидкістю.

У спрощеній моделі метали, розташовані у ряді активності до водню, можуть витіснити його з розведених кислот-неокисників, якщо не заважають пасивація або інші чинники. Мідь, розташована після водню, не витісняє його з розведеної HCl. Для нітратної та концентрованої сульфатної кислот це правило не можна застосовувати механічно, оскільки можливі інші окисно-відновні процеси.



Для металічної поверхні дуже важлива наявність тонкої оксидної плівки. Наприклад, алюміній термодинамічно є активним металом, але в багатьох звичайних умовах має помітну стійкість завдяки захисному шару Al_2O_3 . Тому фактична швидкість взаємодії залежить не лише від положення у ряді активності.

4.2. Витіснення менш активного металу із солі

Якщо активніший метал занурити в розчин солі менш активного, часто відбувається реакція заміщення. Відновлювані йони менш активного металу переходять у металевий стан, а активніший метал окиснюється. Для розчинів солей дуже активних металів у воді потрібно враховувати також можливу реакцію з водою.



Ряд напруг насамперед дозволяє зіставляти стандартні потенціали металів у водних електролітах. Для реальної металевої деталі цього недостатньо: оксидна плівка може блокувати реакцію, а нерівномірне надходження кисню — створювати на поверхні додаткові електрохімічні ділянки. Реакції заміщення бажано аналізувати в кілька кроків: визначити активніший метал, записати віддавання електронів, записати відновлення йонів і перевірити матеріальний баланс. Цей підхід поєднує тему окисно-відновних реакцій із майбутньою темою корозії.



Рис. 7.1. Навчальний ряд електрохімічної активності металів

Джерела розділу: [1, с. 98–100, 114–116]; [2, розд. 10]. [5, розд. про ОВР]

5. Кількісні співвідношення в реакціях металів

5.1. Від рівняння реакції до кількості продукту

Розрахунки окисно-відновних процесів підпорядковуються тим самим стехіометричним законам, які вивчалися у першій лекції. Після урівнювання рівняння визначають кількість речовини за масою, потім — потрібне співвідношення молів реагенту та продукту і, нарешті, шукану масу. Електронний баланс забезпечує правильні коефіцієнти, а не замінює матеріальний розрахунок.

Приклад: у навчальній умові до надлишку розчину CuSO_4 внесли 6,5 г цинку. Для обчислення теоретичної маси міді приймемо округлені навчальні молярні маси $M(\text{Zn}) = 65$ г/моль і $M(\text{Cu}) = 64$ г/моль. За рівнянням реакції один моль цинку відповідає одному молю міді. Отже, кількість цинку становить 0,10 моль, а розрахункова маса міді — 6,4 г за умови повного перебігу реакції.

$$n(\text{Zn}) = 6,5 / 65 = 0,10 \text{ моль} \quad (7.13)$$

$$m(\text{Cu}) = 0,10 \cdot 64 = 6,4 \text{ г} \quad (7.14)$$

Фактичний вихід може бути нижчим через неповний перебіг реакції або втрати під час відокремлення продукту. Якщо в задачі задані масові частки реагентів у технічних матеріалах, спочатку визначають масу чистого реагенту; потім переходять до кількості речовини.

Таблиця 7.2. Послідовність розрахунку

Етап	Що обчислюємо
1	Масу чистого реагенту
2	Кількість речовини реагенту
3	Кількість продукту за коефіцієнтами
4	Теоретичну масу продукту
5	Практичний вихід, якщо заданий

5.2. Перевірка розрахунку

Перед остаточною відповіддю корисно переконатися, що обчислена кількість електронів, переданих відновником, дорівнює кількості електронів, прийнятих окисником.

Після цього перевіряють одиниці вимірювання та коректність округлення. Значення атомних мас бажано брати з однієї обраної таблиці протягом усього розв'язку.

Якщо розчин містить обмежену кількість купрум(II) сульфату, задача змінюється: маса цинку вже не є єдиним обмежувальним фактором. Треба окремо розрахувати кількість Zn і CuSO_4 , зіставити їх за коефіцієнтами рівняння та визначити реагент, який буде витрачений першим. Лише після цього визначають теоретичну масу міді. Такий спосіб потрібний і в виробничих матеріальних балансах, коли вхідна кількість двох компонентів обмежена й надлишок одного не гарантується умовою.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [3, розд. про кількісні закони].

6. Залізо і сполуки Феруму

6.1. Найважливіші ступені окиснення Феруму

У хімічних процесах, пов'язаних зі сталлю, найчастіше розглядають переходи між Fe^0 , Fe^{2+} і Fe^{3+} . Йони Fe^{2+} здатні окиснюватися до Fe^{3+} , зокрема під дією кисню за відповідних умов. Оксиди FeO , Fe_2O_3 і Fe_3O_4 розрізняються складом та співвідношенням ступенів окиснення Феруму. Fe_3O_4 часто розглядають як змішаний оксид із Fe(II) та Fe(III) .



У кислому водному розчині залізо може розчинятися із переходом у Fe^{2+} та виділенням водню, якщо для цього є відповідні умови. За участю кисню, води та інших компонентів можливе утворення гідроксидів і продуктів подальшого окиснення. У практиці це є підґрунтям для розуміння корозії; докладніше її механізм розглянемо у наступній лекції.



6.2. Хімічні властивості як причина технологічної різноманітності

Залізо використовують здебільшого у сплавах, а не як хімічно чистий метал. Інші компоненти, зокрема Карбон, Силіцій, Манган, Хром і Нікель, змінюють структуру, механічні та корозійні властивості сплавів. Під час нагрівання деякі компоненти сплаву можуть окиснюватися легше за інші, тому склад поверхневого оксидного шару не завжди повторює склад об'єму металу.

Для здобувача спеціальності G9 важливо розрізняти хімічний склад початкового сплаву та склад продуктів його взаємодії з газовою фазою. Наприклад, у зоні нагрівання можливі як корисне утворення захисної плівки, так і небажане утворення товстої окалини. Не всі ці процеси можна описати одним рівнянням $\text{Fe} + \text{O}_2$: реальна поверхня складна та неоднорідна.

Fe^{2+} та Fe^{3+} утворюють різні солі й гідроксиди, які можна розрізняти за характерними реакціями. У простих водних системах Fe(OH)_2 може окиснюватися киснем повітря з утворенням сполук Fe(III) . Послідовне перетворення продуктів залежить від кислотності,

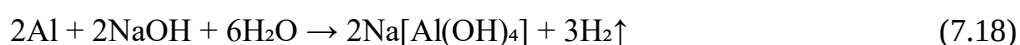
температури та доступу кисню. Через це іржу на сталі не слід описувати як одну чисту хімічну сполуку з незмінним складом. У навчальній схемі достатньо відстежити окиснення металевого заліза до Fe^{2+} і подальше окиснення до Fe^{3+} .

Джерела розділу: [1, с. 114–120]; [3, розд. про Ферум].

7. Амфотерність і пасивація металів

7.1. Амфотерні метали

Алюміній і цинк можуть виявляти амфотерні властивості: за відповідних умов вони реагують як із кислотами, так і з досить сильними лужними розчинами. Під час розчинення в концентрованому лужному середовищі утворюються комплексні гідроксисполуки, а метал окиснюється з виділенням водню. Конкретний склад продукту залежить від концентрації та середовища; наведене нижче рівняння є поширеною навчальною схемою.



7.2. Що таке пасивація

Пасивацією називають різке зменшення швидкості корозійного розчинення металу внаслідок формування на його поверхні захисного стану, найчастіше тонкої оксидної плівки. Для алюмінію та хрому поверхневі оксиди мають важливе захисне значення. Пошкодження плівки, зміна середовища або підвищення температури можуть порушувати пасивний стан; тому слово «пасивний» не означає повністю інертний за будь-яких умов.

Захисна плівка відрізняється від пухкої пористої окалини, крізь яку до металу продовжують надходити кисень і волога. Саме щільність, неперервність і здатність відновлюватися в конкретному середовищі визначають її дію. Тому не варто оцінювати корозійну стійкість сплаву лише за здатністю його компонента утворювати оксид.

У курсі хімії знання про пасивацію з'єднує теми електронної будови елементів, окиснення та майбутнє вивчення корозії. Воно також пояснює, чому хімічне очищення поверхонь і подальша обробка виробів повинні враховувати природу основного металу.

Оксидна плівка може утворитися природно або після спеціального оброблення металу, проте її захисні властивості необхідно пов'язувати з конкретним розчином. Хлорид-іони, наприклад, за несприятливих умов можуть порушувати локальну стійкість пасивних поверхонь. Нагрівання також здатне змінювати структуру й склад поверхневих оксидів. Тому в технічному аналізі розділяють дві задачі: пояснити термодинамічну схильність металу до окиснення та встановити, чи зберігається реальна пасивність за експлуатаційних умов.

Джерела розділу: [1, с. 114–125]; [3, розд. про Алюміній і Хром].

8. Окисно-відновні процеси у виробничих ситуаціях

8.1. Приклади для зварювального виробництва

У зоні високотемпературного зварювання одночасно можуть перебувати розплавлений метал, гази й оксидні сполуки. Хімічна поведінка основного та присадного металів визначає,

які компоненти окиснюватимуться за контакту з киснем. За наявності кремнію або марганцю можливі реакції зв'язування кисню з утворенням їхніх оксидів. Поки достатньо розуміти ці перетворення як окисно-відновні реакції; кількісні баланси розкиснення будуть розглянуті у спеціалізованих темах.



Не кожна умовно урівняна реакція одночасно описує фактичну переважну реакцію у складному багатокомпонентному розплаві. Для реального металу шва важливі температура, склад газу, активності компонентів і час взаємодії. Отже, рівняння, які ми складаємо на цьому етапі, потрібні насамперед для засвоєння хімічного змісту та стехіометрії.

Підсумок теми: визначення ступенів окиснення й електронного балансу дає змогу пояснити реакції металів з киснем, кислотами та розчинами солей. Положення металу в ряді активності допомагає робити якісні передбачення, але реальна швидкість і пасивація залежать від умов середовища та стану поверхні.

Питання для самоперевірки

1. Що називають окисником і відновником?
2. Визначте ступені окиснення Fe у FeO, Fe₂O₃ та Fe₃O₄.
3. Чому цинк витісняє мідь із розчину CuSO₄?
4. Чому мідь не виділяє H₂ із розведеної HCl?
5. Що означає пасивація?
6. Як електронний баланс допомагає урівняти реакцію окиснення магнію?

Під час зіставлення металів для зварювання недостатньо лише визначити, який із них активніше реагує з киснем. Потрібно врахувати, як утворені оксиди впливають на контакт між деталями, чи потрапляють вони в розплав і чи можуть бути видалені шлаком. Водночас кисень може окиснювати не тільки залізо, а й легувальні компоненти. Ці спостереження пояснюють, чому підготовка поверхні та газовий захист становлять важливу частину контролю хімічних процесів у зоні зварювання.

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 7–8, с. 96–120.
- [2] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 10.
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розд. про властивості металів і сполук Феруму.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: окисно-відновні реакції.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ «Теорія окисно-відновлювальних реакцій».

ТЕМА 8

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЇ. КОРОЗІЯ МЕТАЛІВ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ

1. Електрохімічні процеси і корозія металів

Мета лекції. Пояснити утворення електродних потенціалів, роботу гальванічних елементів та основи електролізу; сформулювати уявлення про механізми корозії та доступні способи її запобігання.

План лекції

1. Електроди й гальванічний елемент. 2. Електродні потенціали. 3. Електроліз і закон Фарадея. 4. Хімічна та електрохімічна корозія. 5. Кількісна оцінка корозійних втрат. 6. Захисні покриття й електрохімічний захист.

1.1. Перетворення хімічної енергії в електричну

Електрохімічні процеси відбуваються за участю окисно-відновних перетворень на межі електрода та електроліту. У гальванічному елементі самочинна реакція дає змогу отримати електричну енергію. На аноді відбувається окиснення, на катоді — відновлення; ці визначення залежать від характеру процесу, а не від знака електрода. У гальванічному елементі анод є негативним, катод — позитивним.

Як навчальну модель використовують елемент із цинковим та мідним електродами, зануреними у відповідні розчини солей і сполученими йонним містком. Під час замикання зовнішнього кола електрони переходять від цинку до міді через провідник. Сольовий місток забезпечує перенесення йонів і збереження електронейтральності розчинів, не дозволяючи всім реагентам одразу змішуватися.

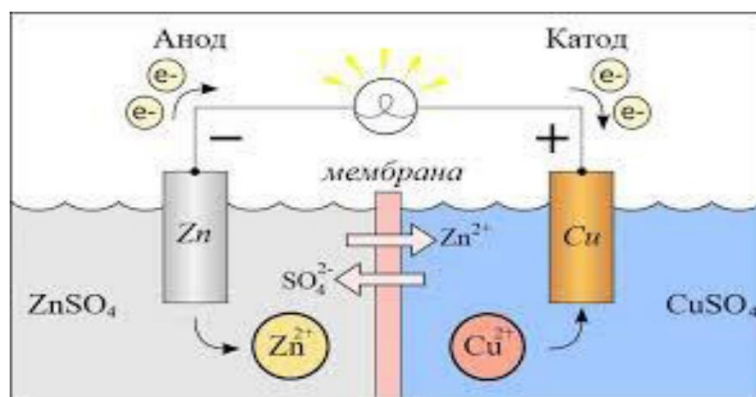


Рис. 8.1. Принципова схема цинково-мідного гальванічного елемента



Сумарне рівняння відбиває взаємодію цинку з йонами міді, але в електрохімічному джерелі енергії напівреакції фізично відокремлені. Саме це дає можливість електронам рухатися через зовнішнє коло і виконувати електричну роботу.

Система електродів у гальванічному елементі працює лише тоді, коли існують шляхи перенесення і електронів, і йонів. Якщо розірвати металевий провідник, електрони не рухатимуться через зовнішнє коло; якщо прибрати йонний зв'язок між напівелементами, у розчинах швидко накопичуватиметься надлишковий заряд. Отже, анод і катод виконують різні хімічні функції, а електроліт і зовнішній провідник забезпечують повний замкнений шлях заряду.

Джерела розділу: [1, с. 98–103]; [2, розд. 2]. [4, розд. про електрохімічні процеси]

2. Електродний потенціал і електрорушійна сила

2.1. Чому на металі виникає потенціал

Під час контакту металу з електролітом між його поверхнею та розчином виникає розподіл зарядів: частина йонів металу може переходити в розчин, а електрони лишаються в металі; можливий і зворотний процес. Так формується подвійний електричний шар. Потенціал окремого електрода вимірюють відносно обраного електрода порівняння, а не як самостійне абсолютне число.

Стандартні електродні потенціали характеризують відносну здатність відповідних окисно-відновних пар до відновлення за стандартних умов. У навчальних таблицях потенціал стандартного водневого електрода умовно приймають рівним нулю. Для пари Zn^{2+}/Zn потенціал приблизно $-0,76$ В, а для Cu^{2+}/Cu — $+0,34$ В; ці округлені табличні значення застосовують у простих задачах за $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 8.1. Приклади стандартних потенціалів відновлення

Електродна пара	E° , В
Zn^{2+}/Zn	$-0,76$
H^{+}/H_2	$0,00$
Cu^{2+}/Cu	$+0,34$

2.2. Обчислення ЕРС

Для цинково-мідного елемента електрорушійна сила за стандартних умов дорівнює різниці стандартних потенціалів катода й анода. Якщо умови відрізняються від стандартних, концентрації та температура змінюють потенціали; тоді використовують рівняння Нернста. У базовій програмі ФМБ достатньо опанувати стандартну різницю потенціалів.

$$E^{\circ}(\text{елемента}) = E^{\circ}(\text{катода}) - E^{\circ}(\text{анода}) \quad (8.3)$$

$$E^{\circ}(\text{Zn}|\text{Cu}) = 0,34 - (-0,76) = 1,10 \text{ В} \quad (8.4)$$

Розташування металу в ряді напруг допомагає якісно оцінювати можливі напрями реакцій у водних розчинах. Однак реальні корозійні процеси, що залежать від концентрації електроліту, кисню та пасивних плівок, не можна передбачити лише за стандартними потенціалами.

Число 1,10 В для стандартного цинково-мідного елемента отримане з табличних значень потенціалів, а не з безпосереднього додавання зарядів йонів. Воно стосується ідеалізованих стандартних умов, тоді як фактична напруга працюючого джерела залежить від концентрацій, внутрішнього опору та навантаження. У задачах ці чинники не враховують, якщо спеціально не введено потрібні вихідні дані. Стандартна електрорушійна сила допомагає визначати напрям можливого самочинного процесу, але не замінює характеристику реального акумулятора.

Джерела розділу: [1, с. 98–103]; [2, розд. 2]; [3, розд. 4].

3. Електроліз і закон Фарадея

3.1. Хімічна дія електричного струму

На відміну від гальванічного елемента, під час електролізу зовнішнє джерело струму примушує систему здійснювати електрохімічні перетворення. Катод у електролізері є негативним електродом, на якому відбувається відновлення; анод — позитивним, і на ньому відбувається окиснення. Продукти електролізу залежать від складу електроліту, матеріалу електродів і режиму процесу.

Для водного розчину CuSO_4 з інертним катодом у спрощеній навчальній моделі мідь може осаджуватися на катоді. Якщо анод мідний і розчиняється, на ньому відбувається окиснення Cu до Cu^{2+} , компенсуючи вилучення йонів із розчину. У водному розчині NaCl не можна очікувати осадження металевого натрію: на катоді насамперед відновлюється вода за відповідних умов.



3.2. Кількісна дія струму

Закон Фарадея пов'язує масу речовини, яка електрохімічно виділилася або розчинилася, із зарядом, пропущеним через електроліт. Заряд дорівнює добутку сили струму на тривалість. Для одержання одного моля електронів потрібний заряд, чисельно рівний сталій Фарадея $F \approx 96\,485$ Кл/моль. Якщо на утворення одного атома металу необхідно z електронів, кількість осадженого металу обернено пропорційна z .

$$Q = I \cdot t \quad (8.7)$$

$$m = M \cdot I \cdot t \cdot \eta / (z \cdot F) \quad (8.8)$$

Тут η — вихід за струмом у частках одиниці. У практичній роботі студентам задаватимуть z , M , I , t та η , тому розрахунок не вимагатиме визначення складного електродного механізму. Отримана маса є теоретичною або скоригованою за заданим виходом, а не гарантією конкретної товщини покриття без урахування площі.

Якщо електрохімічне нанесення покриття ведуть за сталої сили струму, маса осадженого металу пропорційна часу за незмінного виходу за струмом. При подвоєнні часу за

інших незмінних умов теоретична маса осаду також подвоїться. Проте товщина покриття залежить від площі поверхні та рівномірності розподілу струму. Саме тому у виробничих розрахунках крім закону Фарадея враховують густину струму, геометрію деталі й контроль фактичної товщини шару.

Джерела розділу: [1, с. 104–107]; [2, розд. 3].

4. Корозія як хімічний та електрохімічний процес

4.1. Що називають корозією

Корозія — руйнування металів та сплавів унаслідок їхньої хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. За механізмом розрізняють хімічну корозію, що може відбуватися, зокрема, у сухих газах за високих температур, та електрохімічну корозію в середовищах із йонною провідністю. Обидва процеси пов'язані з окисненням металу, проте електрохімічна корозія передбачає просторове розділення анодних і катодних ділянок.

4.2. Анодні та катодні ділянки

На анодній ділянці залізо переходить у розчин у вигляді йонів Fe^{2+} і віддає електрони. На катодній ділянці в аерованому нейтральному водному середовищі може відбуватися відновлення розчиненого кисню. В кислому середовищі можлива катодна реакція відновлення йонів Гідрогену з виділенням водню. Видима іржа утворюється внаслідок подальших перетворень сполук заліза за участю води та кисню.

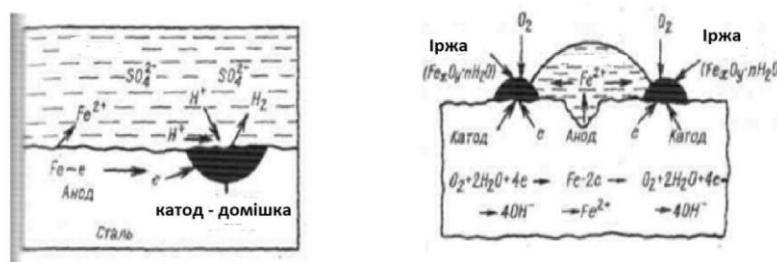


Рис. 8.2. Схематичне виникнення анодних і катодних ділянок під час корозії металу

Контакт двох металів із різними потенціалами в електроліті також може утворювати корозійну гальванічну пару. При цьому більш активний метал часто стає анодом. У зоні зварного з'єднання різниця в структурі, складі та стані поверхні може створювати неоднорідні ділянки, але конкретний напрям і швидкість корозії залежать від умов експлуатації.

Навіть на поверхні одного металу анодні й катодні ділянки можуть виникати через різну доступність кисню, неоднорідний склад або механічний стан. У вологому середовищі вода утворює електролітний шлях, а розчинений кисень за відповідних умов бере участь у

катодному процесі. Подальше утворення малорозчинних продуктів не обов'язково зупиняє руйнування. Ці процеси пояснюють, чому в багатьох металоконструкціях корозія особливо помітна у місцях скупчення води та біля пошкоджених ділянок покриття.

Джерела розділу: [1, с. 120–122]; [3, розд. 2, 4–5].

5. Види корозії та кількісні показники

5.1. Як проявляється корозійне руйнування

Корозія може бути суцільною або місцевою. Під час суцільного руйнування метал втрачає масу на значній площі поверхні; за місцевої корозії небезпечною є концентрація ураження на невеликих ділянках — у вигляді плям, виразок або пітингів. Для зварних конструкцій додаткової уваги потребують місця утримання вологи, щілини та поверхні зі зміненим станом оксидної плівки.

Масові втрати під час випробувань найпростіше оцінювати як різницю мас зразка до та після видалення продуктів корозії за методикою. Якщо відомі площа й тривалість впливу середовища, обчислюють питомий показник масової швидкості корозії. Без правильного очищення зразка та врахування площі порівнювати результати різних випробувань некоректно.

$$K_m = \Delta m / (S \cdot t) \quad (8.11)$$

У формулі K_m — питомі втрати маси, Δm — втрата маси, S — площа досліджуваної поверхні, t — час. Наприклад, за грамами, квадратними метрами й годинами результат має одиницю г/(м²·год). Для наближеної оцінки зменшення товщини потрібна густина сплаву та припущення щодо рівномірності руйнування.

Таблиця 8.2. Ознаки корозійного руйнування

Вид	Що спостерігають	Наслідок для оцінювання
Суцільна	Втрати на значній площі	Можлива оцінка за масою та площею
Пітингова	Глибокі локальні ямки	Мала загальна втрата маси не виключає небезпеки
Щілинна	Ураження у вузьких зазорах	Потрібен контроль конструктивних зон

Кількісний показник за масою не відображає повною мірою небезпеки локальної корозії: виріб із невеликою загальною втратою маси може мати небезпечне локальне стоншення.

Окремо потрібно відрізнити випробування за втратою маси від аналізу небезпечного локального пошкодження. Якщо корозія рівномірна, питома масова швидкість дає змогу порівнювати зразки за однакових умов. Якщо виникають глибокі пітинги, важливішим

показником може бути максимальна глибина ураження та розміщення пошкоджених ділянок. Саме тому інженерне рішення не повинне ґрунтуватися лише на одній числовій характеристиці без огляду поверхні.

Джерела розділу: [3, розд. 2, 9]; [1, с. 120–123].

6. Хімічні та електрохімічні способи захисту

6.1. Усунення контакту металу з середовищем

Один із поширених підходів — ізолювати металеву поверхню від води та агресивних речовин. Для цього застосовують лакофарбові, полімерні та металеві покриття. Якість підготовки поверхні, суцільність захисного шару та його стійкість в умовах експлуатації впливають на тривалість захисної дії. Наявність захисного покриття сама по собі не усуває потреби в контролі його стану.

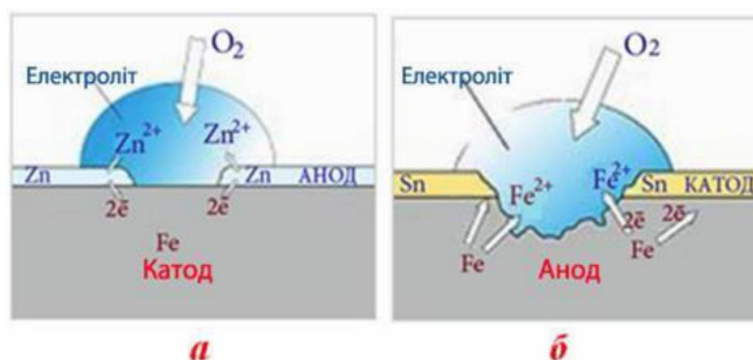


Рис. 8.3. Схематичне порівняння захисної дії різних металевих покриттів

6.2. Цинкове та олов'яне покриття сталі

Цинк є активнішим за залізо й у багатьох електролітах здатний виконувати роль жертвового анода: при пошкодженні покриття він може окиснюватися, захищаючи сталь електрохімічно. Олово в типових умовах благородніше за залізо; за порушення суцільності олов'яного шару оголена ділянка сталі може стати анодною і кородувати прискорено. Тому для оцінювання захисної дії важливий не лише матеріал покриття, а й факт наявності подряпин або пор.

6.3. Протекторний і катодний захист

За протекторного захисту до сталевій конструкції електрично приєднують активніший метал, який окиснюється замість основного. За катодного захисту зовнішнім джерелом струму потенціал конструкції підтримують у потрібному діапазоні. Обидва способи потребують фахового розрахунку й контролю в конкретному електроліті; у курсі загальної хімії вивчаємо тільки фізико-хімічний принцип.

Захисні покриття відрізняються механізмом дії. Лакофарбовий шар переважно ізолює основний метал від середовища. Цинковий шар окрім бар'єрної функції за багатьох умов може працювати протекторно, якщо в ньому виникла подряпина. Навпаки, для благороднішого покриття дефект суцільності може створювати небезпечну гальванічну пару

з основною сталлю. Практичний вибір системи захисту завжди має враховувати склад експлуатаційного середовища.

Джерела розділу: [1, с. 123–125]; [3, розд. 11]. [5, розд. про корозію]

7. Захист зміною складу середовища

7.1. Інгібітори корозії

Інгібіторами називають речовини, невеликі добавки яких до корозійного середовища знижують швидкість руйнування металу. Вони можуть гальмувати анодні або катодні процеси, впливати на утворення захисних плівок чи блокувати активні ділянки поверхні. Ефективність конкретного інгібітора залежить від складу води, температури, концентрації та металу; не існує універсального інгібітора для всіх середовищ.

7.2. Конструктивні та технологічні заходи

Для металевих конструкцій важливі відведення води, зменшення щілин, належне очищення перед нанесенням покриттів та уникнення небажаних поєднань металів у вологому середовищі. У промислових системах можуть контролювати вміст кисню, кислотність та сольовий склад води. Проте зміна одного показника, наприклад рН, не гарантує відсутності корозії: її перебіг визначається сукупністю умов.

Таблиця 8.3. Способи обмеження корозії

Спосіб	Основний принцип	Типове обмеження
Лакофарбове покриття	Ізоляція від середовища	Важлива суцільність шару
Цинкування	Бар'єрний і можливий протекторний ефект	Потребує врахування середовища
Інгібітори	Уповільнення електродних процесів	Працюють не для всіх розчинів
Протекторний захист	Окиснення активнішого металу	Протектор витрачається

Для навчального вибору захисного підходу слід послідовно визначити матеріал конструкції, наявність рідкого електроліту, можливість пошкодження покриття, температуру та вимоги до обслуговування. Без таких вихідних даних порівняння «кращого» методу не буде обґрунтованим.

Під час підготовки поверхні перед фарбуванням важливо видаляти окалину, пухкі продукти корозії, жирові забруднення та залишки речовин, які перешкоджають зчепленню захисного шару з металом. Не слід підміняти цю задачу простим нанесенням товстого покриття на неочищену сталь: під шаром можуть зберігатися осередки корозії та волога. Ця логіка надалі буде використана в темах хімічної підготовки поверхонь і захисту зварних конструкцій.

Джерела розділу: [3, розд. 11–12]; [1, с. 123–125].

8. Підсумок і приклад оцінки корозійних втрат

8.1. Проста розрахункова модель

Навчальна умова: сталевий зразок площею 0,02 м² після випробування протягом 100 год втратив 0,40 г металу. Питомий показник становить 0,20 г/(м²·год). Це число застосовне саме до умов наведеного випробування; воно не є довговічним прогнозом для будь-якої реальної конструкції, особливо за місцевої корозії.

$$K_m = 0,40 / (0,02 \cdot 100) = 0,20 \text{ г/(м}^2\cdot\text{год)} \quad (8.12)$$

Електроліз і корозія використовують ті самі базові поняття — анод, катод, окиснення та відновлення. Відмінність полягає в призначенні системи: в електролізері потрібну реакцію забезпечує зовнішнє джерело електричної енергії, а при корозії небажані окисно-відновні перетворення руйнують матеріал. Для майбутнього зварника розуміння цих механізмів необхідне під час вибору та контролю захисту зварних конструкцій.

Під час реального контролю якості окремо перевіряють зварний шов, навколошовну зону та основний метал. Їхні мікроструктура та стан поверхні можуть відрізнятися, тому огляд тільки великої рівної поверхні не завжди достатній.

Питання для самоперевірки

1. Чому анод завжди є місцем окиснення?
2. Яке призначення сольового містка в гальванічному елементі?
3. Чим електроліз відрізняється від роботи гальванічного елемента?
4. Як за законом Фарадея пов'язані струм і маса осадженого металу?
5. Чому місцева корозія може бути небезпечною за малої втрати маси?
6. Що відбувається після подряпини на цинковому та олов'яному покриттях сталі?

За потреби оцінювати зміну товщини від питомих втрат маси можна перейти до геометричного показника лише за відомої густини та за припущення рівномірного зменшення металу. Якщо поверхня має локальні ураження, таке середнє значення не відображає найглибшої точки корозії. Для зварної конструкції додаткове значення мають форма шва, можливі щілини, стан навколошовної зони та правильність виконаного захисного покриття.

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 7–8, с. 98–125.

[2] Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум. Вінниця: ВНТУ, 2017. Розд. 2–5.

[3] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 2–12.

[4] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ про окисно-відновні та електрохімічні процеси.

[5] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії: для лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХП», 2017. Розділи з електрохімії та корозії.

ТЕМА 9

ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

1. Хімічні властивості металів у зварювальному виробництві

Мета лекції. Пов'язати загальнохімічні знання про метали з процесами у зоні зварювання: окисненням, взаємодією з газами й шлаком, розкисненням і формуванням складу металу шва.

План лекції

1. Реакційна зона зварювання. 2. Фазові взаємодії. 3. Окиснення заліза та компонентів сплаву. 4. Розкиснення. 5. Взаємодія з киснем, азотом і воднем. 6. Вплив складу присадного металу на шов.

1.1. Зона, в якій одночасно існують різні речовини

Під час зварювання плавленням хімічні перетворення відбуваються не тільки в розплавленому металі. До реакційної зони можуть належати основний метал, краплі електродного металу, метал зварювальної ванни, газова фаза й шлак. Між цими учасниками відбувається обмін компонентами та енергією, тому хімічний склад готового шва не завжди збігається зі складом електродного дроту або основного металу.

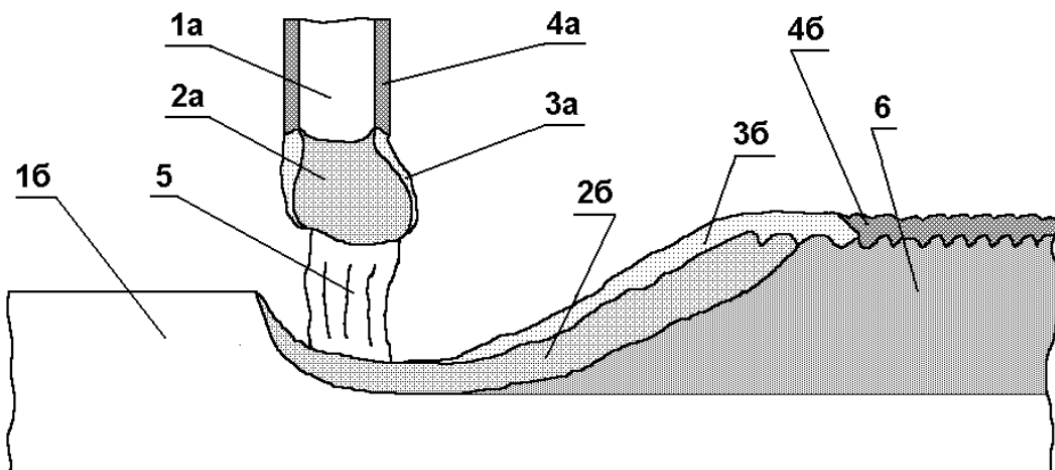


Рис. 9.1. Складові реакційної зони під час ручного дугового зварювання покритим електродом

На схемі показано твердий електродний та основний метали, краплю розплавленого металу, металеву ванну, шлакові ділянки й електричну дугу. Після кристалізації ванни утворюється зварний шов. Залежно від процесу окремі складові можуть бути відсутні: наприклад, під час зварювання в інертному газі без флюсу шлакова фаза може практично не утворюватися.

Хімічний підхід передбачає окремий аналіз складу кожної фази: у металі розчинені легувальні елементи, у шлаку переважають оксиди та інші неметалеві сполуки, а в газовій фазі можуть бути захисні гази, випари металу та газоподібні продукти реакцій. Особливості реакційної зони детальніше розглянуто в навчальному посібнику Коперсака.

За зварювання плавленням реакційна зона не є однорідною посудиною, в якій усі речовини миттєво перемішуються. Крапля електродного металу має власну поверхню контакту з газом і шлаком, а у ванні діють температурні та концентраційні градієнти. Тому можливі втрати одного компонента ще до надходження краплі у ванну та подальші перетворення під час охолодження. Це пояснює, чому матеріальний баланс готового шва повинен починатися з опису всіх можливих шляхів надходження та вибуття речовини.

Джерела розділу: [1, розд. 1, с. 13–20].

2. Металева, газова і шлакова фази

2.1. Чому розрізняють стадію краплі та стадію ванни

Електродний метал спочатку може переходити у краплі, які рухаються через дуговий проміжок, а потім потрапляти до зварювальної ванни. У цих ділянках неоднакові температури, площа контакту з газами та тривалість перебування металу в рідкому стані. Через це ті самі хімічні компоненти можуть реагувати по-різному. Під час охолодження й кристалізації обмін речовин різко сповільнюється, і склад металу шва остаточно формується.

Газова фаза може містити аргон, вуглекислий газ, азот, кисень, водяну пару, продукти дисоціації та випари металів і матеріалів електродного покриття. Важливо не плутати склад захисного газу, який подають у пальник, із фактичним складом газової фази безпосередньо над ванною: там можуть з'являтися продукти високотемпературних перетворень.

2.2. Шлак і його функції

Зварювальні флюси та покриття електродів можуть утворювати шлакову фазу — переважно розплави оксидів та солей. Шлак у різних технологіях захищає рідкий метал від безпосереднього контакту з повітрям, зв'язує частину неметалевих продуктів та бере участь у фізико-хімічній обробці металу. Проте шлак не є інертним укриттям: залежно від складу він може передавати металу окремі елементи або сприяти їхньому окисненню.

Таблиця 9.1. Основні учасники реакційної зони

Фаза	Складові	Хімічне значення
Металева	Основний, присадний метал, ванна	Розчинення та перерозподіл елементів
Газова	Захисні гази, пари, продукти реакцій	Окиснення та газонасичення
Шлакова	Розплави оксидів і солей	Захист, зв'язування продуктів, взаємодія зі сплавом

Під час навчального аналізу спочатку визначають, звідки кожен елемент надходить до ванни, а далі — чи можливий його перехід у газ, шлак або до твердого металу. Такий матеріальний підхід стане основою майбутніх розрахунків складу металу шва.

У металургії зварювання прийнято умовно позначати компоненти металевої фази квадратними дужками, а шлакової — круглими. Такий запис допомагає не плутати однакові елементи й сполуки, які перебувають у різних фазах і мають різну активність. Наприклад, оксид, розчинений у шлаку, не обов'язково поводить себе так само, як окрема чиста тверда речовина. У цьому курсі використовуватимемо звичайні рівняння реакцій, але пам'ятатимемо, що вони спрощують багатофазну картину зварювання.

Джерела розділу: [1, розд. 1, 3, 6–7].

3. Окиснення металів за високих температур

3.1. Роль кисню

У зоні зварювання кисень може надходити з повітря, компонентів захисної газової суміші, вологи, поверхневих оксидів або сполук шлаку. Він здатний реагувати як із залізом, так і з легувальними елементами. Утворення оксидів змінює склад розплаву: частина елементів переходить із металевої фази до неметалевої, а розчинений кисень може впливати на якість майбутнього шва.

Для простих хімічних схем можна розглядати утворення FeO , MnO та SiO_2 . Проте реальні високотемпературні процеси не обмежуються одним рівнянням: співвідношення продуктів залежить від температури, складу ванни та газу. Тому наведені рівняння демонструють можливі напрямки окиснення, а не є завершеним розрахунком складу зварювального шлаку.



3.2. Газ — метал — шлак

Метал і шлак контактують між собою, а газова фаза одночасно контактує з відкритими поверхнями крапель і ванни. Через таку багатофазність окиснення окремого компонента може супроводжуватися його переходом із металу у шлак, а деякі оксиди здатні змінювати склад шлакової фази. Саме ці взаємодії є предметом хімічної металургії зварювання.

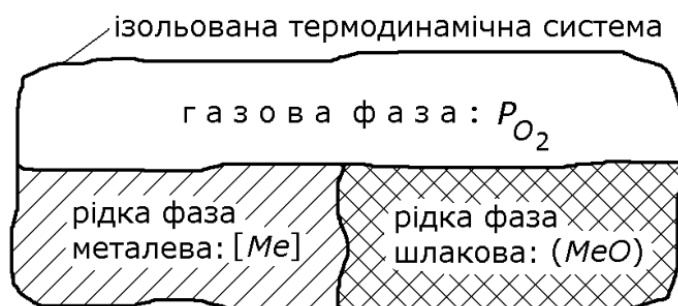


Рис. 9.2. Спрощена схема взаємодії металевої, газової та шлакової фаз під час окиснення

Для майбутніх спеціалістів важливо пов'язати хімічну реакцію з практичним наслідком: якщо легувальний елемент перейшов із металу у шлак у формі оксиду, його масова частка у готовому шві може зменшитися.

У технологічному аналізі важливо зіставляти термодинамічну можливість окиснення та фактичну доступність кисню. Металева ванна може містити деякі вже розчинені оксидні компоненти, навіть коли її поверхня захищена від повітря. З іншого боку, оксиди на поверхні деталей або у складі шлаку можуть стати додатковими джерелами кисню. Через це якісний газовий захист не усуває автоматично всі можливі процеси окиснення розплаву.

Джерела розділу: [1, розд. 5, с. 269–302]. [2, розд. про метали]

4. Розкиснення металу зварювальної ванни

4.1. Для чого потрібні розкиснювачі

Розкиснення — хімічне зв'язування кисню або зменшення його вмісту в металі за допомогою елементів, які в заданих умовах мають достатню спорідненість до кисню. До поширених розкиснювачів у сталевих розплавах належать кремній і марганець. Їхні оксиди можуть переходити в шлак, що зменшує кількість деяких небажаних сполук у металевій фазі.

У спрощених навчальних рівняннях розкиснення можна показати як перенесення кисню від оксиду заліза до кремнію або марганцю. Для кількісних задач використовуватимемо стехіометричні співвідношення, але не плутатимемо їх із реальною рівновагою багатокомпонентної ванни, на яку впливають активності речовин і температура.



4.2. Звідки надходять розкиснювачі

Кремній і марганець можуть бути присутніми у самому основному металі, електродному дроті чи стрижні, а також надходити зі спеціальних добавок у покритті та флюсі. У складних зварювальних матеріалах джерела розкиснювачів поєднуються. Оскільки частина введеного елемента витрачається на хімічну реакцію, його початкова кількість не дорівнює кінцевій кількості у шві.

Результат розкиснення залежить і від видалення продуктів реакції: якщо оксиди не перейшли у шлак або залишилися у металі, вони можуть бути присутніми як неметалеві включення. Питання їхнього утворення й видалення розглядатиметься окремо у спеціалізованих темах.

Початкова кількість розкиснювача повинна бути достатньою для потрібного зв'язування кисню, але надлишок або невдале поєднання компонентів теж змінює склад металу та шлаку. Частина кремнію або марганцю може зберегтися в металі як легувальний елемент, а частина — витратитися на утворення оксидів. Для навчальної задачі ці потоки

розділяють за заданими в умові відсотками переходу. Без таких даних зі стехіометричного рівняння можна визначити лише ідеалізовану теоретичну потребу в реагенті.

Джерела розділу: [1, розд. 5–6].

5. Взаємодія рідкого металу з газами

5.1. Кисень, азот і водень

Газова фаза впливає на склад і властивості металу. Кисень здатний утворювати оксиди та сприяти окисненню легувальних елементів. Азот і водень можуть розчинятися в розплавленому металі; їхня поведінка залежить від температури, складу сплаву та парціальних тисків у газовій фазі. Під час швидкого охолодження змінюється розчинність газів, що створює умови для утворення газових пор або інших небажаних наслідків.

Для сталевих зварних швів водень особливо важливий через можливий вплив на формування холодних тріщин за відповідних металургійних і механічних умов. Джерелами водню можуть бути волога в матеріалах, поверхневі забруднення та деякі складові газового середовища. Тому ретельне очищення, просушування зварювальних матеріалів за вимогами їхнього виробника та належний захист ванни пов'язані з хімічною якістю шва.

5.2. Чому важливий газовий захист

Під час зварювання без ефективного захисту ванна інтенсивніше взаємодіє з атмосферою. Інертні гази, такі як аргон, застосовують для обмеження контакту з повітрям. Активні газові суміші можуть одночасно забезпечувати газовий захист і впливати на окисно-відновні процеси у ванні, тому їхню дію не слід трактувати як цілковиту хімічну інертність.

Таблиця 9.2. Хімічна роль газів

Компонент	Можливий вплив
Кисень	Окиснення металу й легувальних елементів
Азот	Газонасичення та можливе утворення нітридів
Водень	Розчинення в металі, вплив на дефекти за певних умов
Аргон	Створення інертного захисного середовища

Під час аналізу таких систем слід розрізняти джерело газу, механізм його потрапляння до ванни й наслідок для затверділого металу. Саме ця послідовність допомагає пояснити зв'язок між хімічним складом середовища та можливими дефектами.

Гази не лише розчиняються в розплаві, а й можуть утворювати на межах фаз окремі продукти реакцій. У разі швидкої кристалізації частина газу може лишитися у твердіючому металі, тоді як інша встигає покинути ванну. Утворення конкретного дефекту визначається поєднанням складу й температурно-часових умов; немає підстав вважати, що будь-який виявлений пористий шов спричинений тільки воднем або тільки азотом. Хімічний аналіз допомагає визначити можливі джерела, які потрібно перевірити.

Джерела розділу: [1, розд. 4, 6, 10–11]. [3, розд. про метали]

6. Хімічна неоднорідність і формування металу шва

6.1. Основний і присадний метал

Метал шва формується із частини розплавленого основного металу та металу присадки. Їхнє співвідношення впливає на кінцеві масові частки Карбону, Мангану, Силіцію та інших компонентів. Якщо знехтувати випаровуванням, окисненням і переходом елементів у шлак, вміст конкретного елемента в умовному змішаному розплаві визначають за матеріальним балансом.

$$m_i(\text{загальна}) = m(\text{осн.}) \cdot w_i(\text{осн.}) + m(\text{прис.}) \cdot w_i(\text{прис.}) \quad (9.6)$$

$$w_i(\text{шва}) = m_i(\text{загальна}) / (m(\text{осн.}) + m(\text{прис.})) \quad (9.7)$$

Це навчальна модель, а не точний прогноз фактичного складу зварного шва. Для реального зварювання потрібно враховувати втрати через випаровування, окиснення, перехід у шлак, а іноді — додаткове надходження елементів з покриття чи флюсу. Коефіцієнти переходу легувальних елементів залежать від матеріалів і режиму й не можуть бути однаковими для всіх способів зварювання.

6.2. Легування та рафінування

Легуванням називають введення до металу елементів, які забезпечують потрібні властивості. Рафінування пов'язують зі зменшенням кількості небажаних домішок і включень. У зварювальній ванні ці процеси поєднуються з окисненням та розкисненням; тому підбір хімічного складу присадного металу не можна відділяти від дії газового та шлакового середовищ.

У спеціалізованій практичній роботі студенти виконуватимуть лише доступний баланс відомих мас і масових часток, а у висновку відзначатимуть, які види втрат спрощена модель не враховує. Такий підхід формує розуміння хімічного складу шва без складних моделей металургійної рівноваги.

Для змішування двох металевих складових зручно виражати всі масові частки одним способом — або в частках одиниці, або у відсотках із відповідним перерахуванням. Якщо в одній частині вміст елемента зазначений у відсотках, а в іншій у частках, пряме підставлення в одну формулу дасть хибну відповідь. Обчислена початкова концентрація є проміжним результатом: вона не враховує утворення оксидів, випаровування та додаткового легування через флюс чи покриття.

Джерела розділу: [1, розд. 8, с. 404–417].

7. Хімічні причини змін властивостей металу

7.1. Наслідки втрати легувальних елементів

Якщо під час взаємодії розплаву з навколишнім середовищем частина кремнію, марганцю або інших компонентів переходить в оксиди, масова частка цих елементів у металі

шва змінюється. Це може впливати на його структуру та механічні й корозійні властивості. З іншого боку, потрібна кількість розкиснювача може зменшувати шкідливий вплив кисню. Отже, в зварювальному виробництві хімічні перетворення слід оцінювати як систему взаємопов'язаних процесів, а не за окремою реакцією.

7.2. Вміст газів і неметалеві включення

У затверділому металі можуть залишатися неметалеві частинки, що виникли після окиснення та розкиснення. За певних умов газові бульбашки не встигають вийти на поверхню до кристалізації, залишаючи пори. Але пористість не можна пояснювати лише однією причиною: на неї впливають чистота поверхні, склад зварювальних матеріалів, газовий захист і температурно-часові умови.

Таблиця 9.3. Хімічна зміна та можливий наслідок

Зміна	Чому виникає	Потенційний результат
Окиснення Mn або Si	Контакт із доступним киснем	Зміна складу шва, поява оксидів
Надходження Н	Волога й інші джерела	Ризик водневого впливу за певних умов
Надлишок газу під час кристалізації	Зміна розчинності	Можливе утворення пор
Залишені неметалеві частинки	Продукти металургійних реакцій	Неметалеві включення

З цих причин обґрунтування якості металу шва потребує контролю не тільки складу основного та присадного металів, а й умов утворення та видалення продуктів хімічних реакцій. Детальні способи попередження дефектів належать до спеціальних технологічних дисциплін; курс хімії надає їхнє фізико-хімічне підґрунтя.

Під час кристалізації властивості металу визначаються не тільки середнім елементним складом. Значення мають розподіл елементів між окремими ділянками, форма неметалевих частинок і наявність локальних дефектів. Тому два шви із близьким середнім складом за результатами хімічного аналізу можуть мати різну структуру та властивості, якщо відрізнялися умови їхнього формування. Для ФМБ достатньо засвоїти причинний зв'язок між хімічним процесом та можливим матеріальним наслідком.

Джерела розділу: [1, розд. 4–5, 8, 10].

8. Узагальнення: хімічний баланс у зварюванні

8.1. Послідовність аналізу навчальної ситуації

Припустимо, що в навчальному завданні задано маси основного та присадного металів і відомі масові частки марганцю в них. Спочатку визначають масу Mn в кожній частині, потім підсумовують ці маси та обчислюють масову частку в сумарному металі. Якщо окремо

задано умовну частку марганцю, що перейшла в оксид, цю втрату віднімають від балансу металевої фази. Реальний ступінь переходу не встановлюють без експериментальних або довідкових даних.

$$m(\text{Mn, кінц.}) = m(\text{Mn, поч.}) - m(\text{Mn, окисл.}) \quad (9.8)$$

Така модель демонструє прямий зв'язок між хімічною реакцією та складом кінцевого матеріалу. Той самий принцип використовують для попередньої оцінки витрат розкиснювачів та продуктів реакцій у зварювальній ванні. На практичних заняттях він поєднає загальнохімічні задачі на масові частки із спеціалізованими задачами на метали шва.

Підсумок теми: під час зварювання метал взаємодіє з газовою та шлаковою фазами; окиснення, розкиснення, газонасичення та легування впливають на склад металу шва. На рівні фахової передвищої освіти достатньо розуміти учасників цих процесів, складати прості рівняння та виконувати матеріальні баланси за явно заданими припущеннями.

Питання для самоперевірки

1. Які фази входять до реакційної зони зварювання?
2. Чим відрізняються стадія краплі та стадія ванни?
3. Звідки кисень може надходити до розплаву?
4. Яка мета розкиснення кремнієм або марганцем?
5. Чому початковий склад дроту може відрізнитися від складу шва?
6. Якими шляхами водень може потрапити до зварювальної ванни?

Під час підготовки розрахункової роботи студенти мають навчитися чітко записувати припущення. Наприклад: «частка основного металу в суміші задана», «усі маси відомі», «втрати через випаровування в першому наближенні відсутні», «масова частка розкиснювача у сплаві наведена в умові». Такий запис не є зайвим оформленням: він показує, до якої саме моделі належить отриманий числовий результат і чому його не можна без перевірки переносити на реальний зварювальний процес.

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1, 3–8, 10–11.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про метали та їхні сполуки.

[3] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 2 «Неорганічна хімія»: метали.

[4] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми про хімічні властивості металів.

ТЕМА 10

СТАЛІ ТА ЧАВУНИ: ХІМІЧНИЙ СКЛАД І ВПЛИВ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1. Сталі та чавуни як залізовуглецеві сплави

Мета лекції. Розглянути хімічний склад сталей і чавунів, роль вуглецю та основних легувальних елементів; пояснити, як склад сплаву пов'язаний з окисненням і формуванням металу зварного шва.

План лекції

1. Відмінність сталі та чавуну за складом. 2. Роль вуглецю. 3. Сполуки Феруму й Карбону. 4. Кремній і марганець. 5. Хром, нікель та інші легувальні елементи. 6. Прості розрахунки масових часток.

1.1. Основний метал залізовуглецевих сплавів

У машинобудуванні й зварювальному виробництві найпоширенішими металевими матеріалами є сплави на основі заліза. Їхні властивості змінюються залежно від масової частки вуглецю, інших елементів, умов охолодження та подальшої обробки. Сталь і чавун розрізняють насамперед за складом і характерними структурами. Для навчальної класифікації за діаграмою Fe–C зазвичай використовують межу близько 2,14 мас. % вуглецю; промислові марки мають власні стандартні вимоги.

Вуглецеві сталі поряд із залізом і вуглецем містять також невеликі кількості Мангану, Силіцію, Фосфору, Сульфуру та інших елементів. Леговані сталі відрізняються спеціально введеними компонентами, які змінюють характеристики сплаву. У чавунах вуглець може входити до складу цементиту або бути представлений графітом; форма графіту впливає на властивості матеріалу.

Хімія досліджує не лише назву сплаву, а й його елементний склад, взаємодію компонентів із газовим середовищем та утворення оксидів і карбідів. Ці знання пояснюють відмінність поведінки різних сталей при нагріванні, корозії та зварюванні.

Таблиця 10.1. Початкова класифікація залізовуглецевих сплавів

Група	Хімічна ознака	Що важливо для курсу
Вуглецеві сталі	Fe і C з немінучими домішками	Вплив масової частки C
Леговані сталі	Спеціально введені Cr, Ni, Mn, Si тощо	Властивості залежать від складу
Чавуни	Вища частка C, різні форми його перебування	Цементит і графіт

У технічній документації конкретні марки сталей і чавунів установлюють вимогами стандартів, які визначають допустимі інтервали масових часток компонентів. Навчальна границя 2,14% C характеризує поширений поділ залізовуглецевих сплавів за діаграмою стану,

але сам по собі цей показник не визначає всі реальні промислові категорії. Для читання складу потрібно враховувати не лише С, а й Mn, Si, Cr, Ni та небажані домішки, оскільки вони впливають на утворення фаз і поверхневих хімічних продуктів.

Джерела розділу: [1, с. 116–119]; [2, розд. 8].

2. Хімічний склад і форма перебування вуглецю

2.1. Вуглець у сталях

Вуглець є невеликою за масовою часткою, проте надзвичайно важливою складовою сталі. Його вміст впливає на можливість утворення твердих розчинів і карбідів, на твердість, міцність та пластичність після певного режиму обробки. За повільного охолодження зростання вмісту вуглецю зазвичай збільшує частку цементиту й підвищує твердість, водночас може знижувати пластичність. Для реального виробу вирішальне значення має також термічна історія сплаву.

2.2. Ферит, цементит і графіт

У найпростішому описі ферит — твердий розчин Карбону в α -залізі з дуже малою розчинністю; цементит — карбід заліза Fe_3C . У чавунах частина або більшість Карбону може перебувати у формі графіту. Різниця між цементитом і графітом демонструє: однакова сумарна частка Карбону не гарантує однакових властивостей сплаву.

Fe_3C — хімічна формула цементиту (10.1)

Білий чавун у типовому стані характеризується переважним перебуванням вуглецю в карбідній формі, тому має високу твердість і крихкість. У сірому чавуні характерною є наявність пластинчастого графіту; це сприяє добрим ливарним властивостям, але може обмежувати здатність матеріалу сприймати ударні навантаження. Високоміцний чавун містить графіт більш округлої форми, що забезпечує відмінні властивості порівняно із сірим чавуном.

У курсі загальної та прикладної хімії достатньо розрізняти основні форми Карбону в залізовуглецевих сплавах і пояснювати вплив складу на можливість утворення карбідів. Детальний аналіз діаграми стану залізо–цементит та технологій термообробки належить до матеріалознавства.

Хімічна формула цементиту Fe_3C означає співвідношення три атоми заліза до одного атома Карбону. Це допомагає зрозуміти, чому частина Карбону в сталі пов'язана не з окремими графітними включеннями, а з карбідною фазою. Водночас загальна масова частка С у сплаві може включати вуглець у декількох структурних станах. Для хімічної підготовки достатньо розрізняти карбідну та графітну форми; визначення точних фазових часток потребує додаткових діаграм і технологічних умов.

Джерела розділу: [1, с. 117–119]; [3, розд. про сполуки Феруму]. [5, розд. про метали]

3. Види сталей та чавунів

3.1. Вуглецеві та леговані сталі

За хімічним складом сталі поділяють на вуглецеві та леговані. У першій групі головну роль відіграють залізо й вуглець; у другій спеціальні добавки дають змогу змінювати корозійну стійкість, жаростійкість, механічні й інші властивості. За призначенням виділяють конструкційні, інструментальні та сталі з особливими властивостями. Такий поділ не замінює конкретного стандартного позначення марки та вимог до її складу.

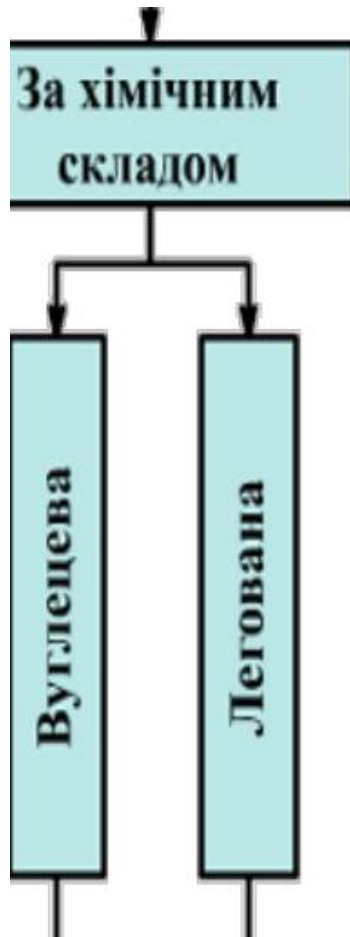


Рис. 10.1. Фрагмент класифікації сталей за хімічним складом

3.2. Види чавуну

Для чавунів важлива форма вуглецю: у білому чавуні значну роль відіграє цементит, у сірому — пластинчастий графіт, у високоміцному — кулястий графіт. Ковкий чавун отримують спеціальною термічною обробкою відповідного вихідного чавуну. Хоча в чавунах загалом більше Карбону, ніж у сталях, лише масова частка С без структурного аналізу не дозволяє визначити всі технологічні властивості матеріалу.

Таблиця 10.2. Порівняння типових видів чавуну

Вид	Характерна форма Карбону	Навчальна характеристика
Білий	Переважно карбіди	Висока твердість, крихкість
Сірий	Пластинчастий графіт	Добрі ливарні властивості

Вид	Характерна форма Карбону	Навчальна характеристика
Високоміцний	Кулястий графіт	Поліпшене поєднання міцності й пластичності

Для зварювального виробництва класифікація є основою для розуміння різної поведінки металів при локальному нагріванні й охолодженні. Але рішення щодо конкретного способу зварювання чавуну потребує окремих технологічних даних, яких у цьому курсі не розраховують.

Джерела розділу: [1, с. 117–119]; [2, розд. 8].

4. Кремній і марганець у залізовуглецевих сплавах

4.1. Кремній

Силіцій може вводиться до сталі як легувальний елемент і як розкиснювач. Через високу спорідненість до кисню кремній утворює стійкі оксиди, що використовують для зменшення вмісту кисню в розплавленому металі. У сталях кремній може впливати на міцність і пружні характеристики, а в чавунах сприяє графітізації. Конкретний результат залежить від вмісту інших елементів та умов охолодження.



4.2. Марганець

Манган є поширеним компонентом конструкційних сталей. У металургійних процесах він бере участь у розкисненні, а також може зв'язувати сірку з утворенням сульфідних сполук. Введення марганцю змінює механічні властивості та фазові перетворення сталей. У зварювальній ванні частина марганцю може окиснитися, тому його вміст у присадному металі не обов'язково дорівнює кінцевому вмісту в металі шва.



У навчальному хімічному розрахунку для феросплаву важливо встановити масову частку активного компонента. Наприклад, якщо задано 0,20 кг сплаву з умовним складом 75% Mn, маса марганцю у ньому за початковими даними становить 0,15 кг. Це лише матеріальний баланс: у реальній ванні частина Mn може залишитися в металі, інша — перейти в оксиди або інші сполуки.

$$m(\text{Mn}) = 0,20 \cdot 0,75 = 0,15 \text{ кг} \quad (10.4)$$

Під час підготовки практичних робіт для таких розрахунків обиратимуться задані в умові частки компонентів і коефіцієнти їхнього використання; вони не подаватимуться як універсальні виробничі нормативи.

Кремній та марганець добре ілюструють різницю між легуванням і розкисненням. Під час легування важливий той елемент, який залишається в сплаві та змінює його властивості. Під час розкиснення елемент витрачається на зв'язування кисню, тому частина його маси

залишає металеву фазу у формі оксиду. Обидві ролі можуть поєднуватися в межах одного процесу, і для матеріального балансу потрібно правильно розділяти залишок елемента та частину, яка прореагувала.

Джерела розділу: [1, с. 117–118]; [2, розд. 5, 8]; [3, розд. про Манган].

5. Хром, нікель та корозійна стійкість сталей

5.1. Хром і пасивна поверхня

Хром є важливим легувальним елементом корозійностійких сталей. За достатнього вмісту хрому та відповідних умов на поверхні може формуватися тонка захисна оксидна плівка, яка істотно сповільнює корозійне розчинення. Її наявність пояснює, чому деякі хромовмісні сплави мають вищу стійкість у конкретних середовищах, ніж звичайні вуглецеві сталі. У сильних хлоридних або інших агресивних середовищах стійкість може порушуватися, тому універсальної «нержавіючості» не існує.

Під час виготовлення зварних конструкцій нагрівання і склад сплаву можуть впливати на захисний стан поверхні та локальну корозійну поведінку. Самого значення масової частки Cr не завжди достатньо для передбачення стійкості конкретного зварного з'єднання.

5.2. Нікель і комбіноване легування

Нікель впливає на фазовий стан і властивості легованих сталей, зокрема може сприяти стабілізації аустенітної структури. У поєднанні з хромом він застосовується для одержання багатьох корозійностійких та жаростійких сталей. Проте вплив елементів не зводиться до простого додавання ефектів: взаємодіють також Карбон, Манган, Молібден та інші компоненти.

Таблиця 10.3. Основні функції легувальних елементів

Елемент	Типовий хімічний та матеріалознавчий внесок
Cr	Участь у формуванні пасивної оксидної плівки
Ni	Стабілізація аустенітної структури в низці сталей
Mn	Розкиснення та зміна структури сплаву
Si	Розкиснення, вплив на властивості сплаву

Кількісний аналіз сплавів починається з достовірного хімічного складу. Вимоги до конкретної марки сталі необхідно брати з відповідної документації; наведена тут таблиця характеризує загальні тенденції, а не гарантує певні властивості за будь-якого відсотка елемента.

Захисна здатність хромовмісної сталі багато в чому пов'язана з хімією поверхні, а не лише з високою механічною міцністю. Пасивний оксидний шар формується й зберігається за певних умов, але може локально руйнуватися в агресивних розчинах. Поєднання Cr та Ni у конкретних марках сталей впливає і на фазовий склад, і на корозійні властивості. Тому під

час вибору металу для зварної конструкції потрібно знати не просто перелік легувальних елементів, а їхні встановлені в документації масові частки.

Джерела розділу: [1, с. 117–118]; [2, розд. 8]; [4, розд. 10–11].

6. Інші легувальні елементи та небажані домішки

6.1. Молібден, ванадій, титан

Легування сталей може бути комплексним. Молібден використовують для зміни високотемпературних і корозійних властивостей певних сплавів; ванадій і титан за відповідних умов можуть утворювати карбіди й нітриди, впливаючи на структуру матеріалу. Для розуміння хімії достатньо знати, що різні легувальні елементи відрізняються спорідненістю до Оксигену, Карбону й Нітрогену, а отже можуть утворювати різні типи хімічних сполук.

6.2. Сульфур і Фосфор

Сульфур і Фосфор у багатьох сталях розглядаються як небажані домішки, рівень яких обмежують вимогами до конкретної марки. Вони можуть погіршувати деякі механічні й технологічні властивості, зокрема за несприятливого розподілу між фазами та межами зерен. Для зварного металу контроль цих домішок важливий через можливі наслідки для схильності до окремих видів тріщиноутворення.

Під час металургійної обробки рідкого металу важливі реакції, що сприяють переведенню частини небажаних компонентів у неметалеві продукти, а також достатнє видалення цих продуктів. У навчальному курсі не розраховуємо складні рівноваги рафінування, але вчимося розрізняти легувальний елемент, розкиснювач і домішку, обмеження якої визначається вимогами до сплаву.

Таблиця 10.4. Приклади ролі елементів

Компонент	Типова роль у сталях
Молібден	Легування спеціальних та жаростійких сталей
Ванадій	Може утворювати карбіди, впливати на структуру
Титан	Здатний зв'язувати Карбон і Нітроген
Сульфур	Зазвичай нормована небажана домішка
Фосфор	Зазвичай нормована небажана домішка

Варто пам'ятати, що наведена класифікація не абсолютна: деякі елементи в окремих сплавах і технологіях можуть вводити спеціально. Оцінка завжди залежить від марки металу та поставленого завдання.

Контроль домішок має також хімічний сенс: у рідкому металі частина Сульфуру, Фосфору та інших компонентів може перерозподілятися між металевою і неметалевою

фазами. При цьому навіть невелика середня масова частка домішки не гарантує її рівномірного розміщення після кристалізації. Саме тому при аналізі схильності металу до дефектів поряд із хімічним складом використовують дані про структуру та технологічний режим. Для навчального рівня досить пояснити ці залежності якісно.

Джерела розділу: [2, розд. 8]; [1, с. 117–119]; [4, розд. 6, 10].

7. Читання позначення марки та простий матеріальний баланс

7.1. Що означають літери й цифри

Для позначення деяких легованих сталей у навчальній літературі використовують літерно-цифрову систему: числа на початку часто вказують орієнтовний вміст Карбону в сотих частках відсотка, а літери позначають легувальні елементи. Наприклад, у посібнику Назарка наведено позначення 12Г2 як приклад маркування сталі з близько 0,10–0,15% С і 1,3–1,7% Мп. Фактичні вимоги до будь-якої конкретної марки встановлює відповідний стандарт, а не сама навчальна схема читання.

7.2. Склад металу та масова частка

Якщо технічні умови або навчальна задача задають масову частку компонента, його масу в заданій партії сплаву знаходять пропорційно. Для умовної партії сталі масою 20 кг із заданим в умові вмістом $C = 0,15\%$ і $Mn = 1,5\%$ маса Карбону становитиме 0,030 кг, а Мангану — 0,300 кг. Такі обчислення потрібні для майбутніх задач на змішування основного та присадного металів.

$$m(C) = 20 \cdot 0,0015 = 0,030 \text{ кг} \quad (10.5)$$

$$m(Mn) = 20 \cdot 0,015 = 0,300 \text{ кг} \quad (10.6)$$

У реальному сплаві сумарна маса всіх компонентів повинна дорівнювати масі партії. Якщо студент підсумовує масові частки елементів, потрібно не забути про залізо як основний компонент та інші домішки, навіть коли їхні значення малі.

7.3. Де застосовують матеріальний баланс

Аналогічно обчислюють склад умовної суміші основного й присадного металів. Якщо задані маси обох складових та вміст марганцю в кожній, масова частка Мп в суміші визначається з відношення сумарної маси Мп до сумарної маси металу. Далі можуть бути задані втрати елемента під час окиснення, але їх не слід призначати довільно без умов задачі.

Перевірка результату матеріального балансу починається з арифметики: усі маси невід’ємні, маса окремого елемента не може перевищувати масу сплаву, а сума мас усіх компонентів дорівнює загальній масі. Для масової частки у відсотках використовують множення на 100, а для частки одиниці — ні. Якщо обчислення проводять послідовно для декількох елементів, зручно застосовувати таблицю з однаковими одиницями й чітко відокремлювати задані значення від обчислених.

Джерела розділу: [1, с. 117–118]; [2, розд. 8].

8. Підсумок і зв'язок зі зварювальним виробництвом

8.1. Чому склад шва може відрізнятися від початкової сталі

Склад металу шва визначається сумарним надходженням елементів із основного та присадного металів, а також їхніми втратами або додатковим надходженням під час металургійних процесів. Частина кремнію й марганцю може окиснюватися, хром і нікель впливають на властивості окремих марок сталі, а вуглець має важливе значення для структурних перетворень. Тому масова частка елемента в основному металі — лише одна з вихідних характеристик.

У межах розрахункової практичної роботи будемо розрізняти два етапи: спочатку обчислення складу умовної металевої суміші за законом збереження маси, потім — обговорення можливих хімічних змін у газовій і шлаковій фазах. Для обчислення реальної кінцевої частки потрібні дані про ступінь переходу елементів та фактичний режим, тому проста формула змішування є навчальним наближенням.

$$w(E, \text{суміш}) = [m_1 \cdot w_1(E) + m_2 \cdot w_2(E)] / (m_1 + m_2) \quad (10.7)$$

Підсумок теми: сталі та чавуни є сплавами заліза з Карбоном й іншими компонентами; збільшення масової частки Карбону змінює типові властивості, а легувальні елементи забезпечують додаткові можливості керування структурою та хімічною стійкістю. Для професії зварника особливе значення мають спорідненість елементів до кисню та їхній можливий перехід між металом, газом і шлаком.

Питання для самоперевірки

1. Яка головна хімічна відмінність сталі та чавуну?
2. Чим відрізняються цементит і графіт?
3. Які хімічні ролі кремнію та марганцю?
4. Чому хром може підвищувати корозійну стійкість?
5. Навіщо до сталі вводять нікель?
6. Чому склад дроту та готового шва можуть відрізнятися?

Здатність складати простий хімічний баланс потрібна майбутньому фаховому молодшому бакалавру не для самостійного проєктування нового промислового сплаву, а для грамотного читання складу матеріалів і розуміння його змін. Вона допомагає відрізняти компоненти, які надходять із основного металу, присадки та флюсу, і пояснювати, чому масова частка певного елемента може зменшитися після окиснення. Детальні металургійні розрахунки за рівноважними константами до цієї практичної підготовки не включасмо.

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Розд. 8.4–8.5, с. 116–119.

[2] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 5, 8.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розд. про Манган, Хром та елементи групи Феруму.

[4] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 10–11.

[5] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 2 «Неорганічна хімія»: властивості металів.

ТЕМА 11

КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА ЇХ СПЛАВИ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

1. Кольорові метали у зварювальному виробництві

Мета лекції. Пояснити хімічні властивості основних кольорових металів і сплавів, роль поверхневих оксидів та газів; показати, як склад металу пов'язаний з особливостями формування зварного з'єднання.

План лекції

1. Класифікація кольорових металів. 2. Алюміній і його сплави. 3. Мідь та мідні сплави. 4. Нікель, титан, магній. 5. Окиснення і взаємодія з газами. 6. Прості розрахунки складу присадного матеріалу.

1.1. Що належить до кольорових металів

Кольоровими називають усі метали та їхні сплави, крім заліза і сплавів на його основі. До цієї великої групи належать алюміній, мідь, магній, титан, нікель, цинк, свинець та інші метали. У техніці їх застосовують завдяки поєднанню електропровідності, теплопровідності, малої густини, корозійної стійкості або спеціальних властивостей. Одна назва «кольоровий метал» не визначає зварюваності: поведінка залежить від конкретного хімічного складу й умов нагрівання.

Для професійної підготовки важливо відокремлювати хімічні властивості від фізичних. Температура плавлення або теплопровідність задають умови теплового впливу; утворення оксидів, поглинання газів і взаємодія з флюсом — це вже хімічні процеси. Під час зварювання вони відбуваються разом і можуть змінювати склад та чистоту розплавленого металу.

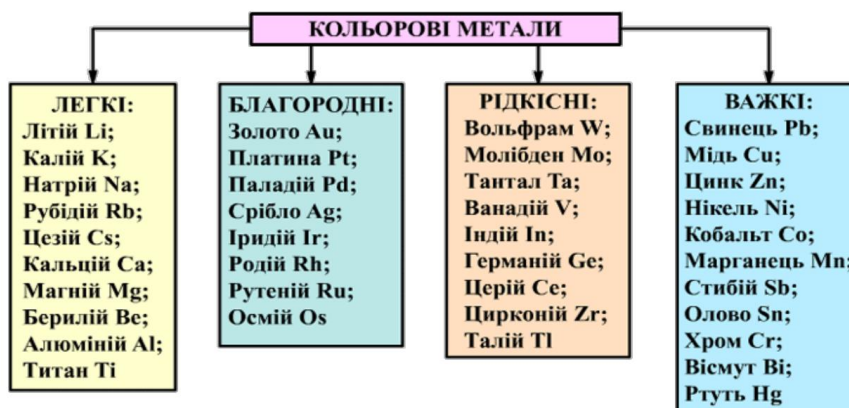


Рис. 11.1. Приклад класифікації кольорових металів

Наведена класифікація є загальною. Вирішуючи завдання для зварювального виробництва, необхідно знати марку основного матеріалу й присадки, а не орієнтуватися лише на належність до групи легких або важких металів.

Джерела розділу: [1, тема 8.1–8.4]; [2, розд. 1, 4].

2. Алюміній та алюмінієві сплави

2.1. Хімічна активність і оксидна плівка

Алюміній хімічно активний, але в повітрі його поверхня швидко вкривається щільною плівкою оксиду Al_2O_3 . Вона відокремлює метал від навколишнього середовища та зумовлює пасивну поведінку за певних умов. Під час зварювання ця сама плівка стає перешкодою: оксид алюмінію має високу температуру плавлення, тому на поверхні рідкого металу він не зникає автоматично. Необхідні підготовка кромки та спосіб зварювання, який забезпечує руйнування або усунення оксидів.



У водних середовищах Al_2O_3 виявляє амфотерні властивості: реагує як із кислотами, так і з лугами за належних умов. Це пов'язано з хімічною підготовкою алюмінієвих поверхонь. Після очищення свіжа поверхня знову окиснюється, тому стан її перед зварюванням має особливе значення. До навчального курсу не включаємо вибір промислової технології травлення або режимів зварювання: ці рішення належать до спеціальних дисциплін.

2.2. Сплави на основі алюмінію

У сплавах алюмінію можуть бути присутніми магній, кремній, мідь, цинк, марганець та інші компоненти. Їхні поєднання впливають не лише на механічні властивості, а й на хімічну активність розплаву. Деякі легувальні елементи активно окиснюються, а присутність водню за певних умов пов'язана з утворенням пор під час тверднення металу. Тому склад присадного дроту та чистота поверхні повинні відповідати конкретному матеріалу.

Таблиця 11.1. Хімічні питання під час зварювання алюмінію

Чинник	Хімічне значення	Практичний наслідок
Al_2O_3 на поверхні	Стійка тугоплавка оксидна плівка	Потреба в очищенні й захисті
Mg у сплаві	Може активно окиснюватися	Можлива зміна вмісту легувального елемента
Водень у розплаві	Розчинність залежить від стану металу	Ризик газових пор при твердненні

Джерела розділу: [2, розд. про алюміній]; [3, розд. 4–5]. [4, розд. про алюміній]

3. Мідь та сплави на її основі

3.1. Хімічна характеристика міді

Мідь характеризується високою електро- і теплопровідністю; тому її використовують для електротехнічних виробів та теплообмінного обладнання. При нагріванні в окиснювальному середовищі мідь може утворювати оксиди Cu_2O і CuO . У зварювальній

ванні важливо обмежувати небажане надходження кисню, оскільки наявність оксидів і розчинених газів може впливати на цілісність з'єднання.



Під час аналізу мідних виробів слід розрізняти мідь високої чистоти та технічні сплави. Навіть невеликі добавки або домішки здатні змінювати умови утворення оксидів і газів. Для деяких мідних сплавів леткі або активні компоненти можуть частково втрачатися під час нагрівання; величину таких втрат не можна визначити зі складу без додаткових вихідних даних.

3.2. Латунь, бронза та мідно-нікелеві сплави

Латуні — це переважно сплави міді із цинком, а бронзи — група сплавів міді з оловом або іншими компонентами. Мідно-нікелеві сплави утворюють окрему групу. Для хімічного розгляду мають значення оксидні продукти кожного компонента, можливий перехід елементів у газову або шлакову фазу та початковий вміст домішок. У виробничому розрахунку їхній конкретний склад завжди беруть із сертифіката матеріалу.

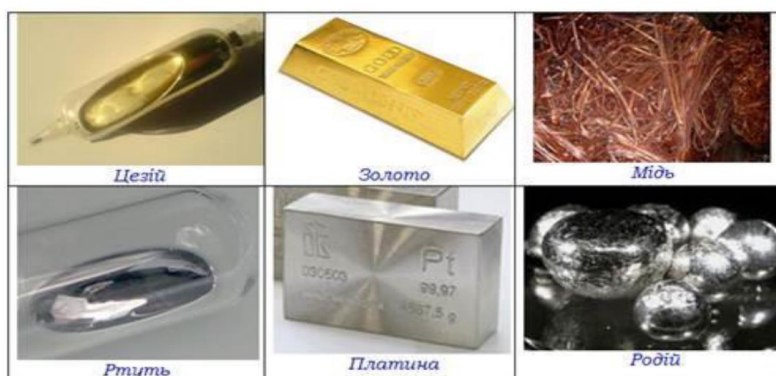


Рис. 11.2. Приклади кольорових металів, що використовуються в техніці

У курсі ФМБ достатньо зрозуміти різницю між чистим металом і сплавом та встановити, який саме компонент може брати участь у небажаному окисненні. Розрахунок точного складу зварного шва за наявності випаровування вимагає даних про реальний процес.

Джерела розділу: [1, тема 8.4]; [2, розд. про Купрум].

4. Нікель, магній та титан у зварювальному виробництві

4.1. Нікель та його сплави

Нікель застосовують як самостійний конструкційний метал і як важливий компонент корозійностійких, жароміцних та спеціальних сплавів. Його поведінка при зварюванні визначається також хромом, залізом, молібденом та іншими елементами конкретної марки. Для пояснення хімічних процесів аналізують можливість утворення оксидів і взаємодію металевої ванни із захисним середовищем. Те, що елемент входить до корозійностійкого сплаву, не означає відсутності всіх реакцій при високій температурі.

4.2. Особливості магнію

Магній належить до легких хімічно активних металів. Під час нагрівання він швидко взаємодіє з киснем з утворенням оксиду MgO. У багатьох алюмінієвих сплавах магній є легувальним компонентом, тому зміна його частки під час високотемпературної обробки має значення для кінцевого складу металу. У навчальних рівняннях використовуємо прості реакції, а не переносимо їх безпосередньо на багатокомпонентну зварювальну ванну.



4.3. Особливості титану

Титан здатний утворювати стійкі сполуки з киснем і азотом. За високих температур його поверхня та розплав особливо чутливі до складу газової атмосфери. Внаслідок цього значення має захист не лише безпосередньо рідкої ванни, а й ще гарячих ділянок металу. Протягом лекції розглядаємо лише хімічну причину такої чутливості; конкретні вимоги до обладнання й витрати газу встановлюють технологічні документи.

Таблиця 11.2. Порівняння хімічних особливостей

Метал	Типове хімічне питання	Що перевіряють
Ni	Окиснення компонентів легованого сплаву	Марку та склад матеріалу
Mg	Висока спорідненість до кисню	Можливе вигорання компонента
Ti	Утворення оксидів і нітридів	Повноту захисту нагрітих зон

Джерела розділу: [2, розд. про метали]; [3, розд. 4–6].

5. Оксиди й гази: що змінюється під час зварювання

5.1. Поверхневий оксид і розчинений кисень

Плівка на поверхні виробу та кисень у рідкій металевій фазі — не одне й те саме. Оксид може зберігатися як тверда або рідка неметалева частинка; за певних умов він взаємодіє з металом або компонентами шлаку. Розчинений кисень бере участь у реакціях з елементами, які мають відповідну хімічну спорідненість. Тому видалення видимої окалини і газовий захист є взаємодоповнювальними, але не тотожними заходами.

Під час аналізу зварювання алюмінію чи титану важливо згадати різну стійкість оксидів. Однаковий факт контакту з повітрям не означає однакового хімічного результату для різних матеріалів. Крім термодинамічної можливості утворення сполуки, значення мають швидкість надходження газу, стан поверхні та час перебування металу за високої температури.

5.2. Водень і газова пористість

У розплаві деяких металів водень може розчинятися значно інакше, ніж у твердому металі. При охолодженні й кристалізації надлишок газу може виділятися з розчину. Якщо бульбашки не встигають піднятися та вийти з металу до його тверднення, утворюються пори. Хімічними джерелами водню можуть бути волога та інші водневмісні речовини, що потрапляють у реакційну зону.

5.3. Принцип «матеріал — середовище — результат»

Описуючи дефект, не можна робити висновок лише за його зовнішньою ознакою. Спершу встановлюють матеріал і його марку, далі — джерела газу та оксидів, потім — можливий процес взаємодії у ванні. Аналіз завершують перевіркою умов очищення поверхні й захисту. Такий алгоритм є хімічним поясненням і не підмінює дефектоскопію чи повноцінний аналіз причин браку.

Джерела розділу: [3, розд. 4–5, 10]; [2, розд. про властивості металів].

6. Склад сплаву та змішування матеріалів

6.1. Масова частка компонента

Для кольорових сплавів, як і для сталей, застосовують масову частку елемента. Якщо відомі маса металу та відсоток певного компонента, масу цього елемента знаходять множенням загальної маси на частку, виражену десятковим дробом. Отримане число є кількістю елемента в заданій партії металу, а не обов'язково кількістю, яка перейде в готовий шов.

$$m(E) = m(\text{сплаву}) \cdot w(E) \quad (11.5)$$

6.2. Змішування основного та присадного металів

У простій навчальній моделі зварний метал розглядають як суміш двох металевих складових. Якщо задані їхні маси та масові частки одного елемента, його початковий вміст у суміші отримують із закону збереження маси. Для цього в чисельнику підсумовують маси елемента з кожного джерела, а в знаменнику — загальну масу металу. Хімічні реакції, випаровування і надходження компонента з флюсу на цьому першому етапі не враховують.

$$w(E, \text{суміш}) = [m_1 w_1(E) + m_2 w_2(E)] / (m_1 + m_2) \quad (11.6)$$

Для правильної відповіді всі маси повинні бути виражені в одних одиницях, а частки — в одному форматі: десятковими дробами або у відсотках із відповідним перерахуванням. Після завершення обчислення потрібно переконатися, що підсумкова частка перебуває між початковими частками, якщо не введено жодного іншого джерела чи втрати елемента.

Таблиця 11.3. Послідовність навчального матеріального балансу

Етап	Відомі величини	Результат
1	Маси двох металів	Загальна маса суміші

Етап	Відомі величини	Результат
2	Склад кожної складової	Маса елемента у кожній
3	Сума мас елемента	Його початкова масова частка
4	Задані втрати або приріст	Уточнений склад за умовою

Джерела розділу: [1, тема 8.4]; [3, розд. 8.1].

7. Підготовка поверхонь і хімічна чистота

7.1. Чому перед зварюванням очищують поверхню

На металевих заготовках можуть бути оксидні плівки, залишки мастил, волога та інші забруднення. За нагрівання такі речовини можуть утворювати додаткові гази або продукти реакцій, що потрапляють до зварювальної ванни. Хімічна підготовка поверхні спрямована на усунення небажаних джерел домішок і створення відтворюваних вихідних умов. Для кольорових металів особливо важливо враховувати швидкість повторного окиснення очищеної поверхні.

Знежирення, механічне очищення та хімічне видалення оксидів вирішують різні завдання. Органічне забруднення не завжди зникає після видалення окалини, а механічне полірування без подальшого захисту не виключає появи нової тонкої плівки. Схему підготовки визначають за вимогами до конкретного матеріалу; навчальна лекція пояснює призначення операцій, але не задає рецептур небезпечних розчинів.

7.2. Очищення й газовий захист — різні процеси

Очищення виконують до початку зварювання. Газовий або газоплаковий захист діє вже під час формування ванни та крапель переносимого металу. Якщо на кромці залишається забруднення, саме по собі інертне газове середовище не гарантує відсутності продуктів його розкладу. Навпаки, чиста поверхня без достатнього захисту може повторно взаємодіяти з повітрям у гарячій зоні.

Для майбутнього фахівця важливе правило: кожну операцію пов'язують із певною хімічною причиною. Знежирення зменшує надходження органічних речовин, видалення оксидів — неметалевих плівок, висушування — вологи, а газовий захист — контакту з киснем і азотом атмосфери. Наскільки цього достатньо, визначають конкретними виробничими умовами.

Джерела розділу: [3, розд. 4, 6]; [2, розд. про оксиди металів]. [5, розд. про корозійну стійкість]

8. Підсумок і навчальний алгоритм аналізу

8.1. Як пояснювати поведінку кольорового металу

Для хімічної характеристики матеріалу спочатку встановлюють його основний елемент і легувальні добавки. Потім з'ясовують, які оксиди можуть утворюватися на поверхні

та які компоненти найбільш чутливі до газового середовища. Окремо оцінюють можливість потрапляння вологи, оксидів і домішок до реакційної зони. Нарешті, за потреби складають простий матеріальний баланс основного й присадного металів.

Головне узагальнення: кольорові метали значно різняться за хімічною поведінкою. Для алюмінію показовою є стійка оксидна плівка; для міді — взаємодія з киснем та особливості її сплавів; для магнію — висока активність; для титану — чутливість до газового середовища за високих температур. Наявність сплаву у зварній конструкції ще не визначає єдину технологію: її обирають на основі марки матеріалу, призначення з'єднання та відповідних технологічних вимог.

8.2. Зв'язок із наступними темами

Наступна тема присвячена енергетиці й високотемпературним процесам. Вона пояснить, чому температура впливає на хімічну рівновагу і швидкість реакцій. Далі розглядатимемо окисно-відновні процеси, взаємодію розплавленого металу з киснем, азотом і воднем та формування складу шва. Отже, вивчення кольорових металів готує до аналізу тих самих процесів у багатокомпонентній зварювальній ванні.

Питання для самоперевірки

1. Чому алюміній одночасно хімічно активний і корозійностійкий у багатьох умовах?
2. У чому полягає різниця між оксидною плівкою та розчиненим киснем?
3. Чим відрізняються латунь і бронза?
4. Чому для титану важливий захист нагрітої зони?
5. Як обчислити початкову частку компонента у суміші двох металів?
6. Чому не можна вважати склад присадки тотожним складу готового шва?

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 8, с. 108–120.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Алюміній та Купрум.

[3] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1, 4–6.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 2 «Неорганічна хімія»: кольорові метали.

[5] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розділ про корозійну стійкість металів.

ТЕМА 12

ЕНЕРГЕТИКА ТА ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ

1. Теплові та хімічні явища у реакційній зоні зварювання

Мета лекції. Розглянути джерела енергії під час зварювання, перетворення електричної і хімічної енергії, нагрівання та плавлення металу; пояснити особливості високотемпературних реакцій на доступному рівні.

План лекції

1. Реакційна зона й джерела енергії. 2. Спрощений тепловий баланс. 3. Теплові ефекти реакцій. 4. Вплив температури на окиснення. 5. Хімічна рівновага і швидкість. 6. Підготовка до розрахунків.

1.1. Чим зварювання відрізняється від звичайного нагрівання

Під час зварювання плавленням у невеликій реакційній зоні одночасно перебувають тверді кромки, рідкий метал, газова атмосфера і, залежно від способу, рідкий або твердий шлак. Зона має нерівномірну температуру; її ділянки перебувають у різних фізичних станах. Надходження тепла від джерела енергії супроводжується перенесенням речовини й утворенням нових сполук. Тому поняття «температура зварювання» не завжди можна звести до одного числа для всієї системи.

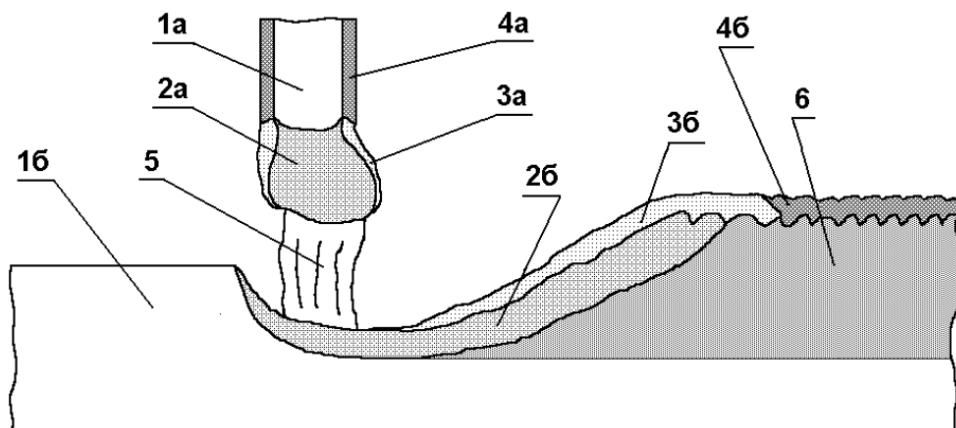


Рис. 12.1. Реакційна зона дугового зварювання та її складові

Основним енергетичним джерелом за дугового зварювання є електрична енергія. За газового зварювання теплота утворюється внаслідок хімічного горіння паливного газу в кисні. Під час електрошлакового зварювання електрична енергія перетворюється на теплоту в шлаковій ванні. Оскільки механізми різні, порівнювати всі процеси за однією універсальною формулою без відповідних припущень не можна.

Джерела розділу: [1, розд. 1–2]; [2, тема 5].

2. Електрична енергія дуги та корисне тепло

2.1. Визначення енергії за струмом і напругою

Для початкового розрахунку енергії дуги за сталих напруги та струму використовують добуток цих величин на час горіння дуги. Напруга вимірюється у вольтах, сила струму — в амперах, час — у секундах; результат одержують у джоулях. У цій моделі не описують перехідні режими, коливання параметрів або форму електричного сигналу.

$$E = U \cdot I \cdot t \quad (12.1)$$

Не вся підведена енергія надходить до виробу. Частина витрачається на нагрівання навколишнього газу, електрода, оснащення та інші процеси. Для простого навчального балансу вводять ефективний коефіцієнт корисного використання енергії, який задають в умові задачі, а не приймають однаковим для всіх способів зварювання. Розрахунок показує лише прийняту енергетичну модель.

$$Q_{\text{кор}} = \eta \cdot E \quad (12.2)$$

2.2. Від джоуля до кілоджоуля

Під час виконання практичної роботи важливо узгодити одиниці: 1 кДж дорівнює 1000 Дж. Якщо потужність наведено у кіловатах, а час — у хвилинах, потрібно привести дані до узгоджених одиниць або правильно врахувати множники перетворення. Поширена помилка — підставляти час у хвилинах до формули зі значеннями в одиницях СІ та отримувати результат, менший у шістдесят разів.

Таблиця 12.1. Величини спрощеного енергетичного балансу

Позначення	Фізичний зміст	Одиниця
U	Напруга дуги	В
I	Сила струму	А
t	Тривалість процесу	с
E	Підведена електрична енергія	Дж
η	Заданий ефективний коефіцієнт	частка одиниці
$Q_{\text{кор}}$	Корисна теплова енергія	Дж

Джерела розділу: [1, розд. 2]; [3, розд. «Термодинаміка»]. [4, розд. про термодинаміку]

3. Нагрівання металу та його плавлення

3.1. Кількість теплоти для підвищення температури

Щоб оцінити потребу в енергії для нагрівання металевої заготовки, використовують масу, середню питому теплоємність та різницю кінцевої й початкової температур. У межах навчальної задачі теплоємність задають сталою для вибраного інтервалу. У реальних металах

вона залежить від температури, а фазові перетворення можуть супроводжуватися додатковими тепловими ефектами.

$$Q_{\text{нагр}} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (12.3)$$

Для плавлення вже нагрітого до температури плавлення металу потрібна додаткова енергія, хоча температура чистої речовини під час ідеалізованого фазового переходу залишається сталою. Цю частину балансу характеризують питомою теплотою плавлення. Для сплавів перехід із твердого до рідкого стану часто відбувається в інтервалі температур, але для ФМБ у задачі можна використовувати задану умовну температуру та питому теплоту плавлення.

$$Q_{\text{пл}} = m \cdot \lambda \quad (12.4)$$

3.2. Складання найпростішого балансу

Суму теплоти нагрівання та плавлення зіставляють із корисною енергією джерела. Якщо необхідно знайти теоретичну масу розплавленого металу, спочатку обчислюють енергію на один кілограм, а потім ділять задану корисну енергію на цей питомий показник. Такий результат не є прогнозом реальної форми шва: у ньому не описано теплопровідність у глибину металу, перегрів розплаву та вплив рухомого джерела тепла.

$$Q_{\text{потр}} = m \cdot [c \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda] \quad (12.5)$$

Особливо важливо не плутати енергію всієї операції та енергію, потрібну для нагрівання лише наплавленого металу. Основний матеріал навколо шва також поглинає тепло, а отже баланс, складений лише для маси шва, є наближенням із чітко зазначеними межами застосування.

Джерела розділу: [1, розд. 2.3–2.4]; [3, розд. «Термохімія»].

4. Тепловий ефект хімічної реакції

4.1. Екзотермічні та ендотермічні процеси

Хімічне перетворення може супроводжуватися виділенням або поглинанням тепла. Реакції окиснення багатьох металів за відповідних умов виділяють теплоту, а розклад деяких карбонатів, що входять до складу електродних покриттів, потребує підведення енергії. Через це компоненти газошлакового захисту впливають не лише на склад середовища, але й на енергетичний баланс реакційної зони.

Тепловий ефект хімічного перетворення визначається вихідними речовинами, продуктами, агрегатними станами й умовами процесу. Якщо термохімічне рівняння записано для певної кількості речовини, змінюючи коефіцієнти, відповідно змінюють і кількість теплоти. Саме тому під час розрахунків треба уважно читати рівняння та одиниці в довідковій таблиці.

4.2. Закон Гесса

Закон Гесса стверджує: тепловий ефект реакції за однакових початкового й кінцевого станів не залежить від шляху, яким здійснено перетворення. На його основі можна підсумовувати термохімічні рівняння та знаходити невідомі ефекти за відомими. У навчальному курсі доцільно використати просту схему перетворення Карбону на вуглекислий газ без складних термодинамічних таблиць.

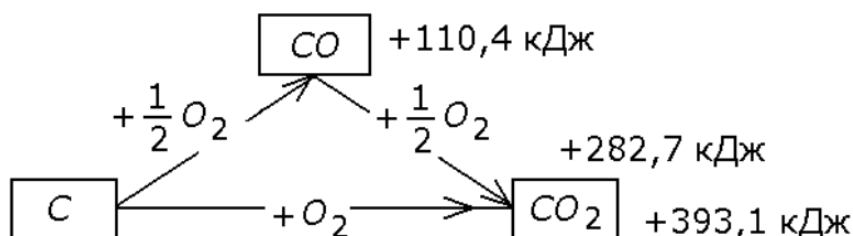


Рис. 12.2. Ілюстрація закону Гесса на прикладі окиснення Карбону

$$\Delta H_{\text{реакц}} = \sum \nu \cdot \Delta H^{\circ}_{\text{утв}}(\text{продуктів}) - \sum \nu \cdot \Delta H^{\circ}_{\text{утв}}(\text{реагентів}) \quad (12.6)$$

Для використання цієї формули в умові задачі потрібно надати стандартні ентальпії утворення відповідних речовин. Самі лише хімічні формули не дають числового значення теплового ефекту. Не слід також змішувати теплоту горіння, визначену за стандартних умов, із фактичним тепловим навантаженням нагрітого виробу.

Джерела розділу: [1, розд. 2.3]; [2, тема 5]. [5, розд. про термохімію]

5. Чому температура змінює хімічні процеси

5.1. Термодинамічна можливість і фактична швидкість

Висока температура може одночасно прискорювати реакції та змінювати їхній рівноважний стан. Проте «реакція швидша» й «утворюється більше продукту» — різні твердження. Швидкість характеризує, як швидко змінюється кількість речовин, а рівновага — співвідношення компонентів після встановлення рівноважного стану за заданих умов. У зварювальній ванні час існування рідкої фази обмежений, тому фактичний результат може відрізнятись від умовного рівноважного прогнозу.

5.2. Розпад і утворення оксидів

За нагрівання стійкість деяких оксидів може змінюватися. Для порівняння різних реакцій окиснення в металургії використовують термодинамічні характеристики утворення оксидів. Такі діаграми допомагають якісно оцінити, який елемент сильніше зв'язує кисень за певної температури. У цьому курсі ми пояснюємо принцип порівняння, а не вимагаємо від студентів самостійно будувати діаграми за великими наборами термодинамічних даних.

Висока температура також впливає на поведінку газів: частина молекул може дисоціювати, а активні частинки здатні реагувати з рідким металом. Тому склад газової фази поблизу дуги не обов'язково тотожний складу газу, який подали з балона. Ця обставина пояснює необхідність окремого розгляду кисню, азоту й водню в наступних лекціях.

Таблиця 12.2. Питання, які не можна плутати

Питання	Що характеризує	Які дані потрібні
Чи можлива реакція?	Термодинамічний напрям	Енергія Гіббса та умови
Як швидко відбувається?	Кінетика	Температура, концентрація, механізм
Який склад буде в рівновазі?	Рівноважний стан	Константи, температура, склад

Джерела розділу: [1, розд. 2–5]; [3, розд. 4–6].

6. Газова, металева й шлакова фази

6.1. Міжфазні процеси

У реакційній зоні зварювання речовини переходять через межі фаз. Метал може розчиняти газ, крапля присадного матеріалу взаємодіє з газовою атмосферою ще до надходження до ванни, а компоненти шлаку можуть зв'язувати оксиди або брати участь в обміні елементами. Кожен такий процес має власні умови контакту, температуру й тривалість. Тому навіть однаковий загальний хімічний склад матеріалів не гарантує однакового складу готового шва.

6.2. Теплота і фазовий стан

Нагрівання підводить енергію не лише до металу, а й до шлаку та захисних газів. Частина енергії витрачається на плавлення й випаровування окремих компонентів. Якщо певна складова має помітну леткість за температури реакційної зони, її фактична частка в металі може зменшуватися. Однак без даних про швидкість випаровування й час нагрівання розрахувати такі втрати неможливо; у навчальних задачах їх вводять окремо як задані величини.

Утворення шлаку із суміші оксидів і солей супроводжується хімічними й фізичними змінами. Його задача — захистити розплав від безпосереднього контакту з повітрям і забезпечити певні умови металургійних реакцій. Склад шлаку впливає на властивості цього середовища. Водночас не кожен шлак автоматично забезпечує повне видалення всіх небажаних домішок: процес залежить від складу, температури та часу контакту.

6.3. Навчальний облік енергії

У спрощеному енергетичному балансі окремо записують підведену енергію, корисне нагрівання, плавлення та інші втрати, якщо вони задані. Не можна двічі враховувати ту саму складову: наприклад, включати задані втрати через коефіцієнт ефективності й повторно віднімати їх без пояснення. Перед початком обчислення студент повинен коротко виписати всі прийняті припущення.

Джерела розділу: [1, розд. 1–3, 6–7].

7. Приклад послідовності енергетичного розрахунку

7.1. Вихідні дані та схема розрахунку

Навчальна виробнича ситуація: необхідно оцінити, яка частина підведеної енергії може бути витрачена на нагрівання і плавлення заданої маси сталі. Викладач надає напругу, силу струму, час горіння дуги, ефективний коефіцієнт, середню теплоємність, питому теплоту плавлення та початкову й умовну температуру плавлення. На першому етапі студент обчислює підведену електричну енергію, на другому — корисну теплоту, а на третьому — питому потребу в теплоті для підготовленої маси металу.

Четвертий етап — зіставлення енергетичної потреби з доступним теплом; п'ятий — обчислення теоретичної маси, яку можна нагріти та розплавити за прийнятою схемою. Шостим етапом можна ввести окрему реакцію з відомим тепловим ефектом і порівняти її масштаб із енергією дуги. Така послідовність містить декілька пов'язаних розрахунків і готує до практичної роботи, не вимагаючи інженерного моделювання теплового поля.

7.2. Типові помилки

Перша помилка — неправильний перехід між джоулями та кілоджоулями. Друга — підставлення температури в градусах Цельсія там, де потрібна абсолютна температура Кельвіна; для різниці температур числові прирости в °C і K однакові. Третя — використання маси в грамах разом із теплоємністю на кілограм. Четверта — прийняття заданого ефективного коефіцієнта за універсальну фізичну константу. Правильний навчальний розрахунок має містити одиниці для кожної проміжної величини.

$$m_{\text{теор}} = Q_{\text{кор}} / [c \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + \lambda] \quad (12.7)$$

Джерела розділу: [1, розд. 2]; [3, розд. про термохімічні розрахунки].

8. Висновки та підготовка до окисно-відновних процесів

8.1. Енергетика не замінює хімічний аналіз

Висока температура робить можливими плавлення, інтенсивний масообмін і різноманітні хімічні реакції. Але тільки за значенням електричної потужності не можна визначити ні склад металу шва, ні кількість розкиснювача, ні концентрацію газів у ванні. Для цього потрібні окремі дані про початковий склад, доступність реагентів і хімічну рівновагу. Саме тому енергетичний баланс є лише однією частиною загальної картини зварювального процесу.

Під час навчання корисно розділяти величини, які вимірюють або задають: струм, напругу, час, масу та температуру; величини, які обчислюють: енергію, корисне тепло і питому потребу в ньому; та якісні висновки: які реакції можуть активізуватися під час нагрівання. Такі розмежування допоможуть надалі пояснити утворення оксидів і розкиснення зварювальної ванни.

8.2. Підсумок теми

Зварювальна зона є багатофазною високотемпературною системою. Підведена енергія витрачається на нагрівання, плавлення та супутні процеси; хімічні реакції теж можуть мати теплові ефекти. Температура впливає і на швидкість реакцій, і на їхній рівноважний стан, проте не визначає фактичний результат без урахування умов контакту й часу існування ванни.

Питання для самоперевірки

1. Які фази можна виділити у реакційній зоні?
2. Як визначити підведену електричну енергію дуги?
3. Чому вводять ефективний коефіцієнт використання енергії?
4. Чим відрізняються теплота нагрівання і плавлення?
5. У чому полягає закон Гесса?
6. Чому термодинамічна можливість реакції не гарантує її швидкого перебігу?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1–3, 5–7.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 5, с. 60–76.

[3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–6.

[4] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ «Елементи хімічної термодинаміки».

[5] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи про термодинаміку та кінетику.

ТЕМА 13

ОКИСНО-ВІДНОВНІ ПРОЦЕСИ У ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ЗОНІ ТА ЗВАРЮВАЛЬНІЙ ВАННІ

1. Окиснення та відновлення в реакційній зоні зварювання

Мета лекції. Пояснити хімічну сутність окиснення металів у зварювальній зоні, роль відновників і розкиснювачів, взаємодію металевої та шлакової фаз; підготувати до простих стехіометричних розрахунків.

План лекції

1. Електронна сутність ОВР. 2. Джерела кисню в зоні зварювання. 3. Утворення оксидів. 4. Розкиснення металу. 5. Роль кремнію і марганцю. 6. Прості матеріальні баланси.

1.1. Чим окисно-відновна реакція важлива для зварного шва

Під час зварювання плавленням кисень взаємодіє як з основним металом, так і з присадними та легувальними елементами. Окиснення означає віддавання електронів, а відновлення — їх приєднання. У високотемпературній ванні ці процеси пов'язані з утворенням оксидів, зміною складу металу та шлаку, а іноді — з утворенням газоподібних продуктів. Отже, реакції окиснення-відновлення впливають на те, які елементи залишаться у готовому шві.



Наведене рівняння є навчальною стехіометричною схемою. Реальна система залізо–кисень має декілька можливих оксидів, і їхня стійкість залежить від температури та складу середовища. Кисень може бути не тільки в атмосфері, але й у вже наявній оксидній плівці та в компонентах шлаку. Тому контроль окиснення не зводиться до простого перекриття доступу зовнішнього повітря.

Джерела розділу: [1, розд. 1, 5]; [2, тема 7].

2. Джерела кисню й поверхневі оксиди

2.1. Повітря і газова фаза

Атмосфера містить молекулярний кисень. У реакційній зоні дугового зварювання газу піддаються сильному нагріванню; за відповідних умов можуть утворюватися хімічно активні частинки. Контакт крапель електродного металу та поверхні ванни з газовою фазою створює можливість окиснення. Цей контакт триває різний час для краплі, металу ванни та ділянок, що вже почали твердіти.

2.2. Оксидна плівка основного металу

Поверхня металевих заготовок нерідко вкрита природними оксидними плівками або окалиною після термічних операцій. Частина таких продуктів може надходити до зварювальної ванни разом з металом. Додатковим джерелом кисню можуть бути оксиди у

складі окремих зварювальних матеріалів. Саме тому перед зварюванням важливо враховувати стан поверхні й хімічний склад захисних матеріалів.

2.3. Оксиди заліза та легувальних елементів

За певних умов залізо утворює FeO , Fe_3O_4 і Fe_2O_3 . Кремній і марганець також можуть окиснюватися; їхні оксиди часто переходять до неметалевої фази. Не можна автоматично вважати, що вся маса оксиду, який виник під час зварювання, залишиться у шві. Частина продуктів переходить у шлак, інша може залишитися у вигляді включень або бути видалена під час формування ванни.

Таблиця 13.1. Джерела кисню у реакційній зоні

Джерело	Форма кисню	Можливий наслідок
Атмосферний газ	O_2 та активні частинки	Окиснення поверхні металу
Оксидна плівка	FeO , Al_2O_3 та інші оксиди	Неметалеві частинки у ванні
Компоненти шлаку	Оксиди металів	Міжфазні окисно-відновні реакції

Для кількісного балансу потрібні вихідні дані про масу відповідних оксидів і коефіцієнти їх участі в реакціях. Без цих даних можливо описати напрям взаємодії, але не обчислити реальне засвоєння кисню металом.

Джерела розділу: [1, розд. 5.1–5.2]. [3, розд. про ОВР]

3. Термодинамічні передумови розкиснення

3.1. Хімічна спорідненість до кисню

Різні метали й легувальні елементи по-різному зв'язують кисень. Щоб порівнювати можливість утворення оксидів за різних температур, у металургії використовують значення зміни енергії Гіббса. Якщо за прийнятих умов утворення оксиду певного елемента термодинамічно вигідніше, такий елемент може використовуватися для відбирання кисню від менш стійкого оксиду. Але фактичний результат залежить від концентрацій, температури, активності речовин і часу контакту фаз.

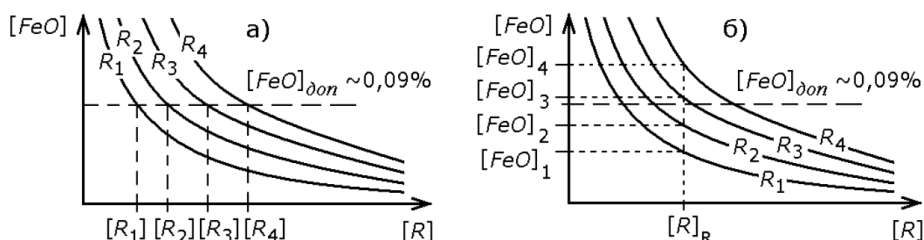


Рис. 13.1. Схематичний вплив концентрації розкиснювача на залишковий вміст FeO

Спеціалізований графік слугує ілюстрацією принципу, а не готовою розрахунковою номограмою для практичної роботи ФМБ. На цьому рівні достатньо розуміти, чому

розкиснювач повинен мати достатню спорідненість до кисню й утворювати продукт, який можна відокремити від металу.

3.2. Хімічна можливість і кінетика

Реакція, яка термодинамічно можлива, не завжди встигає пройти повністю за короткий час існування зварювальної ванни. Потрібні контакт між реагентами, достатня кількість розкиснювача та умови для відділення неметалевих продуктів. Тому в реальному процесі залишкова кількість кисню не може бути визначена лише за одним рівнянням реакції.

У навчальній задачі спершу розраховують теоретичну потребу в реагенті за правильно урівняним рівнянням. Після цього, якщо викладач задає коефіцієнт корисного використання розкиснювача, визначають необхідну початкову масу. Ці два результати мають різне значення: перший впливає зі стехіометрії, другий — із прийнятої моделі втрат.

Джерела розділу: [1, розд. 2, 5.1, 5.3].

4. Кремній та марганець як розкиснювачі

4.1. Розкиснення кремнієм

Кремній має високу хімічну спорідненість до кисню. У спрощеній схемі розкиснення залізовмісної ванни він взаємодіє з оксидом заліза, утворюючи діоксид кремнію та відновлюючи залізо. Таку схему зручно використовувати для розрахунку маси потрібного кремнію та маси оксидного продукту. У реальних зварювальних умовах склад шлаку й активності компонентів впливають на рівновагу реакції.



4.2. Розкиснення марганцем

Марганець також може відновлювати залізо з його оксиду. При цьому утворюється оксид марганцю, який входить до складу неметалевої фази. Марганець здатний виконувати подвійну роль: одна частина надходить до готового шва як легувальний елемент, інша витрачається під час розкиснення. Тому для аналізу складу металу необхідно відрізнити введений марганець від того, який залишився після реакції.



4.3. Дві реакції в одному навчальному балансі

Якщо для оброблення умовної партії оксиду використовують і кремній, і марганець, початкову масу FeO треба розподілити між двома реакціями. Не можна двічі застосувати повну масу FeO: це порушить закон збереження маси. Після окремих розрахунків підсумовують теоретичні кількості розкиснювачів і продуктів. Якщо в умові надано концентрації Si або Mn у феросплавах, їхню необхідну масу визначають із масових часток.

Таблиця 13.2. Приклади простих схем розкиснення

Розкиснювач	Навчальне рівняння	Оксидний продукт
-------------	--------------------	------------------

Розкиснювач	Навчальне рівняння	Оксидний продукт
Кремній	$2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$	SiO_2
Марганець	$\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$	MnO

Джерела розділу: [1, розд. 5.3, 8.1]. [4, розд. про енергетику реакцій]

5. Газоподібні продукти й металургійні наслідки

5.1. Вуглець як учасник реакцій

Вуглець може взаємодіяти з киснем, розчиненим у сталевому розплаві або зв'язаним в оксидах. Одним із можливих газоподібних продуктів є монооксид вуглецю CO. Утворення газових бульбашок у рідкому металі може впливати на його очищення, але за несприятливого перебігу тверднення спричиняти газові пори. Тому роль вуглецю не можна оцінювати лише за тим, що він здатний виступати відновником.



Реакцію наведено як модель; у реальній ванні вона залежить від активності вуглецю й оксиду, температури та умов видалення газу. Виробничий висновок про пористість не роблять лише з наявності Карбону в марці сталі. Потрібно враховувати доступність кисню, характер захисту й інші джерела газів.

5.2. Неметалеві включення

Продукти розкиснення утворюють неметалеві частинки. Для одержання якісного шва частина цих продуктів має перейти у шлак або іншим чином відокремитися від рідкого металу. Якщо певна кількість включень затримується у металі після кристалізації, вони можуть впливати на його властивості. Хімічний склад оксидів та властивості шлаку визначають можливість їх взаємодії, об'єднання й видалення.

Не слід розглядати розкиснення як безумовно повне видалення кисню без наслідків. Кожна реакція утворює власні продукти, а частина вихідних елементів може залишитися у шві. У межах курсу ФМБ важливо бачити цей матеріальний обмін між металом, газом і шлаком.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3, 7, 10].

6. Взаємодія металевої та шлакової фаз

6.1. Як шлак бере участь у хімічному перетворенні

Шлак утворюється з розплавлених оксидів, солей та інших компонентів, уведених у зону зварювання або отриманих унаслідок реакцій. Він може створювати захисний шар і забезпечувати умови для переходу оксидних продуктів із металевої фази. Хімічні властивості шлаку залежать від співвідношення його складових і температури. Одна й та сама речовина може мати різну активність у чистому вигляді та в багатокомпонентному шлаковому розплаві.

6.2. Розкиснення та легування — різні результати

Якщо кремній або марганець утворив оксид і перейшов до шлаку, його кількість у металі зменшується. Якщо частина елемента не прореагувала, вона може залишитися у металі шва та виконувати роль легувального компонента. За потреби в навчальній задачі вихідну масу елемента ділять на дві частини: масу, що прореагувала, та масу, яка залишилася. Без даних про ступінь переходу й утрати реальний поділ визначити неможливо.

6.3. Від матеріального балансу до якості шва

Схема обміну компонентами між фазами пояснює, чому склад дроту та склад готового шва не є тотожними. Після хімічних реакцій змінюються не тільки масові частки легувальних елементів: утворюються оксидні продукти, частина яких видаляється, а частина залишається в металі. Властивості шва визначаються також кристалізацією, розподілом домішок і наявністю дефектів; одного хімічного аналізу для повного прогнозу недостатньо.

Роль шлаку особливо наочна під час зварювання покритими електродами й під флюсом. Однак різні типи покриттів і флюсів мають неоднакову хімічну поведінку, тому фактичний процес розкиснення встановлюють для конкретного матеріалу.

Джерела розділу: [1, розд. 6–8].

7. Стехіометричний розрахунок витрат розкиснювача

7.1. Від оксиду до потрібної маси кремнію

Щоб побудувати послідовність практичної роботи, спочатку задають масу FeO , яку необхідно умовно відновити. За молярною масою знаходять його кількість речовини. Далі за рівнянням $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$ визначають, скільки молів кремнію припадає на розраховану кількість оксиду. На третьому етапі знаходять теоретичну масу чистого кремнію. На четвертому — розраховують масу феросиліцію за заданою часткою Si . На п'ятому — за потреби враховують заданий коефіцієнт використання кремнію.

$$n(\text{FeO}) = m(\text{FeO}) / M(\text{FeO}) \quad (13.5)$$

$$n(\text{Si}) = n(\text{FeO}) / 2 \quad (13.6)$$

$$m(\text{Si}) = n(\text{Si}) \cdot M(\text{Si}) \quad (13.7)$$

7.2. Продукти та контроль балансу

Окремо обчислюють теоретичну масу SiO_2 і відновленого Fe . Суму мас реагентів порівнюють із сумою мас продуктів для правильно урівняного рівняння. Якщо застосовано феросплав, загальна маса якого більша за масу чистого кремнію, потрібно пояснити, що решта компонентів у цій простій схемі розглядаються окремо. Це навчальне припущення не гарантує реального переходу всіх компонентів феросплаву до металу.

У розрахунковій роботі для ФМБ важливо не вводити складних рівноважних виразів. Студент має навчитися складати рівняння, застосовувати кількісні співвідношення й розрізняти теоретичну витрату та практичну потребу за заданими вихідними даними.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3]; [2, тема 7].

8. Підсумок і самоперевірка

8.1. Логічний зв'язок усіх окисно-відновних процесів

Окисно-відновні процеси у зварювальній зоні починаються з надходження кисню та його взаємодії з компонентами металу. Частина елементів окиснюється, утворюючи оксиди; спеціально введені розкиснювачі здатні зв'язувати кисень і змінювати його розподіл між фазами. Газоподібні та тверді продукти повинні бути враховані під час пояснення можливих дефектів, а зміна масових часток важлива для визначення складу готового шва.

Для навчальної практики достатньо розрізнити три рівні опису: правильне хімічне рівняння; теоретичний стехіометричний баланс; реальний процес, для якого потрібні додаткові дані. Саме ця послідовність запобігає помилці, коли ідеалізовану кількість розкиснювача вважають готовою виробничою нормою.

8.2. Перехід до теми про гази

У наступній лекції окремо розглянемо кисень, азот і водень як компоненти газової фази, що взаємодіють із розплавленим металом. Після цього можна буде пов'язати газові й окисно-відновні реакції з матеріальним балансом та формуванням хімічного складу шва.

Питання для самоперевірки

1. Що є окисненням і відновленням у реакціях металів?
2. Назвіть основні джерела кисню у зварювальній зоні.
3. Для чого застосовують кремній і марганець?
4. Чому теоретична й фактична витрати розкиснювача можуть відрізнитися?
5. Яку роль виконує шлак?
6. Чому виділення СО може мати різні наслідки для зварного шва?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 2, 5–8, 10.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 7, с. 96–107.

[3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи про окисно-відновні процеси.

[4] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи про термодинаміку хімічних процесів.

ТЕМА 14

ВЗАЄМОДІЯ РОЗПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ З КИСНЕМ, АЗОТОМ І ВОДНЕМ

1. Газова фаза та розплавлений метал зварювальної ванни

Мета лекції. Пояснити, як кисень, азот і водень потрапляють до реакційної зони, взаємодіють із рідким металом і можуть впливати на склад та якість зварного шва.

План лекції

1. Газова фаза під час зварювання. 2. Розчинність газів у металах. 3. Кисень і оксиди. 4. Азот і нітриди. 5. Водень і газова пористість. 6. Хімічні шляхи обмеження небажаних взаємодій.

1.1. Чому гази мають значення

Метал зварювальної ванни перебуває у контакті з газовою фазою й нагрівається до високої температури. Молекули та активні частинки газів можуть взаємодіяти з його поверхнею, частково розчинятися або утворювати нові сполуки. За різних способів зварювання склад газової фази відрізняється: на неї впливають повітря, захисний газ, продукти розкладу електродного покриття, газоутворювальні компоненти дроту й окремі домішки.

Поняття «газова фаза» не означає, що в ній присутні тільки вихідні молекули. За високої температури можливі дисоціація, реакції та утворення інших активних частинок. Тому хімічну поведінку газів оцінюють з урахуванням температури й умов у конкретній ділянці реакційної зони. Для базового курсу не потрібно розраховувати плазмову рівновагу — важливо знати можливі шляхи взаємодії.

Таблиця 14.1. Основні гази та пов'язані з ними питання

Газ	Хімічна роль	На що впливає
O ₂	Окиснення компонентів металу	Оксиди, втрати елементів
N ₂	Взаємодія з металом за високої температури	Розчинення, можливі нітриди
H ₂ і водневмісні частинки	Розчинення водню в рідкому металі	Пористість, вплив на властивості

Джерела розділу: [1, розд. 4–5]. [2, розд. про Оксиген]

2. Як газ потрапляє до рідкого металу

2.1. Межа між газом і металом

Щоб газ опинився в рідкому металі, спочатку він має досягти поверхні розплаву. Далі можливі його розчинення, дисоціація молекули та перенесення окремих атомів у металевій фазі. Наскільки інтенсивно відбувається кожний етап, залежить від складу газу, температури,

стану поверхні й тривалості контакту. Особливо інтенсивний газометалевий обмін можливий на поверхні крапель електродного металу під час їхнього перенесення до ванни.

2.2. Розчинність — не те саме, що хімічна реакція

Газ може бути розчиненим у металевому розплаві, а може утворювати оксид або нітрид. Розчинений елемент не обов'язково відразу переходить у нову сполуку. Під час охолодження його розчинність здатна змінюватися, а частина речовини може виділятися назад у газову фазу. Саме це має значення для пористості: газові бульбашки, які не встигли вийти до тверднення металу, можуть залишитися у шві.

2.3. Навіщо розділяти етапи процесу

Практично корисно аналізувати ланцюг «джерело газу — його надходження — розчинення або реакція — поведінка під час кристалізації». Наприклад, волога на кромках може бути джерелом водню; але для утворення пор потрібно ще, щоб відповідна кількість водню потрапила у ванну, залишилася там і не вийшла до завершення тверднення. Отже, наявність потенційного джерела не дорівнює автоматичному утворенню конкретного дефекту.

У навчальних задачах задане співвідношення об'ємів захисних газів використовують для матеріального розрахунку, але не підставляють його без поправок у склад газової фази над рідким металом: реальні високотемпературні реакції можуть цей склад змінювати.

Джерела розділу: [1, розд. 3.6, 4].

3. Кисень і окиснення рідкого металу

3.1. Окиснення заліза та легувальних елементів

Кисень відзначається високою хімічною активністю. За контакту з розплавленою сталлю він взаємодіє з залізом та компонентами, які мають відповідну спорідненість до кисню. Оксиди можуть надходити в шлак, залишатися як неметалеві включення або брати участь у подальших реакціях. Для зварного шва суттєвою є не лише загальна кількість кисню, а й те, у якій формі він перебуває.



Залізо утворює декілька оксидів. За високих температур, характерних для зварювальної ванни, різні оксиди мають неоднакову стійкість. Оксиди на кромках та в краплях присадного металу можуть стати додатковим джерелом кисню, навіть якщо надходження зовнішнього повітря обмежене.

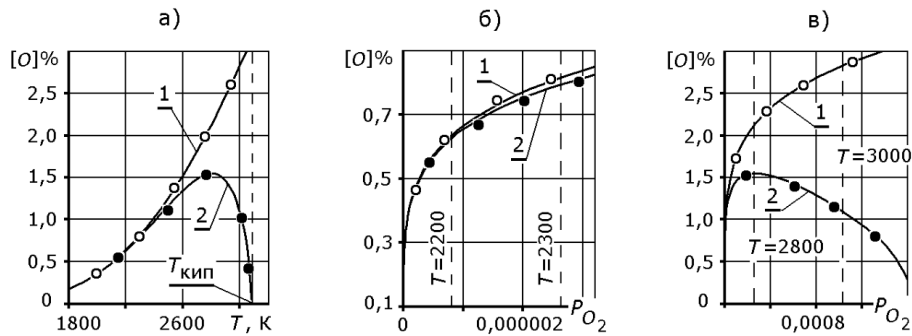


Рис. 14.1. Залежність вмісту кисню у розплаві від температури й тиску кисню

3.2. Розчинений кисень і розкиснення

Частина кисню може перебувати в металевій фазі у розчиненому стані. Для його зв'язування застосовують елементи, що утворюють стійкі оксиди; у сталевому зварювальному виробництві особливо важливі кремній і марганець. Продукти цих реакцій повинні по можливості перейти до неметалевої фази. Недостатньо лише записати, що кисень «зник»: згідно із законом збереження маси він переходить до відповідних продуктів реакції.

Джерела розділу: [1, розд. 5.1–5.3].

4. Азот і його взаємодія зі сталевую ванною

4.1. Надходження азоту

Молекулярний азот є основним компонентом повітря. За звичайної температури він порівняно малоактивний, але за дуже високої температури й у контакті з активною поверхнею металу його поведінка змінюється. Азот може надходити в реакційну зону з повітря або інших газових середовищ і за певних умов розчинятися в рідкому металі. Інтенсивність процесу залежить не тільки від частки N_2 , а й від стану газової фази й металу.

4.2. Азот у металі та нітриди

Після потрапляння до металевої фази Нітроген може перебувати в розчині або утворювати нітриди з окремими легувальними елементами. Нітридоутворювальні елементи впливають на його хімічний стан. Важливо не робити спрощеного висновку, ніби будь-який азот у сталі неодмінно створює пори: наслідки залежать від його кількості, форми перебування, структури й умов охолодження металу.

У навчальному поясненні азот можна розглядати як приклад хімічного елемента, що переходить між газовою та металевою фазами. Але обчислити фактичну концентрацію у зварному шві лише за відсотком азоту в навколишньому повітрі неможливо. Для цього потрібні термодинамічні й кінетичні дані та відомості про умови процесу.

4.3. Хімічні умови запобігання небажаному азотуванню

Для зменшення надходження азоту до реакційної зони використовують належний газовий, газошлаковий або шлаковий захист відповідно до технології. Важливо забезпечити захист не лише поверхні ванни, а й крапель переносимого металу. Конкретну якість захисту

визначають не за назвою газу, а за фактичними умовами його подавання та станом робочої зони.

Джерела розділу: [1, розд. 4.1–4.2]. [3, розд. про водень]

5. Водень: джерела, розчинення і виділення

5.1. Звідки надходить водень

Потенційними джерелами водню у зварювальній зоні є волога, забруднення поверхні та інші водневмісні речовини, які надходять разом із матеріалами або газовим середовищем. За нагрівання вони можуть розкладатися або брати участь у реакціях, утворюючи водневмісні частинки. Тому очищення та висушування поверхонь мають хімічне значення, а контроль стану витратних матеріалів є одним із напрямів профілактики дефектів.

5.2. Водень у рідкій і твердій фазах

Розчинність водню в металі залежить від температури й фазового стану. Для низьковуглецевої сталі відмінність його поведінки в рідкому та твердому металі має важливі наслідки під час кристалізації. Якщо під час охолодження надлишок водню виділяється у формі газу, бульбашки можуть або вийти із ванни, або затриматися у металі й утворити пори. Інша частина водню може залишитися в твердому металі та впливати на його властивості.

Водень також розглядають у зв'язку з можливими холодними тріщинами. Проте наявність водню є лише однією з умов у складному механізмі, де значення мають структура металу й механічний стан зварного з'єднання. Саму масову частку водню не слід розглядати як єдиний критерій утворення тріщин.

5.3. Чому важливий час тверднення

Швидкість охолодження визначає, скільки часу має газова бульбашка для переміщення до вільної поверхні. Якщо тверднення відбувається швидше за вихід газу, ризик пористості може зростати. Разом з тим кінцевий результат залежить від конкретної конфігурації ванни, поверхневих явищ та розподілу газу. На рівні ФМБ ці залежності розглядаємо якісно, не обчислюючи швидкість руху бульбашок.

Джерела розділу: [1, розд. 4.3, 10–11].

6. Порівняння впливу кисню, азоту і водню

6.1. Три гази — різні хімічні процеси

Кисень насамперед пов'язаний з окисненням металу й легувальних елементів, появою оксидних продуктів та потребою в розкисненні. Азот за відповідних умов може розчинятися в металі або утворювати нітриди. Водень особливо важливий через розчинення та можливе виділення при охолодженні, а також через вплив залишкового водню на властивості металу. Ці процеси не можна звести до однакової схеми «газ потрапив — виникла пора».

Таблиця 14.2. Порівняння поведінки газів у зварювальній ванні

Газ	Основний хімічний процес	Можливий наслідок	Шлях обмеження
Кисень	Окиснення та розкиснення	Оксиди, включення, зміна складу	Захист і розкиснювачі
Азот	Розчинення та утворення нітридів	Зміна складу й властивостей	Обмеження контакту з повітрям
Водень	Розчинення та виділення при охолодженні	Пористість, вплив на властивості	Контроль вологи й забруднень

6.2. Чому потрібний комплексний аналіз

У реальній реакційній зоні кисень, азот і водень можуть діяти одночасно. Наявність оксидної плівки впливає на контакт газу з металом; зміна складу ванни може впливати на її здатність розчиняти гази; утворені шлаки змінюють міжфазний обмін. Тому аналіз одного газу корисний для навчання, але недостатній для повного прогнозу якості конкретного зварного з'єднання.

Газова фаза не є єдиним джерелом усіх небажаних компонентів: вони можуть потрапляти також із основного та присадного матеріалів, флюсу, покриття й забруднень. У кожному випадку студенту потрібно чітко розрізняти джерело, форму перебування й хімічний наслідок.

Джерела розділу: [1, розд. 4–6, 10].

7. Захисне середовище та чистота вихідних матеріалів

7.1. Призначення захисних газів

Газовий захист призначений для обмеження контакту рідкого металу з навколишнім повітрям. Залежно від процесу застосовують інертні гази, активні гази або їхні суміші. Склад поданої суміші визначає початкове середовище, але за високої температури можливі додаткові хімічні перетворення. Тому об'ємні частки компонентів суміші й концентрації активних частинок безпосередньо біля дуги не слід вважати тотожними.

7.2. Хімічна чистота кромок і матеріалів

Підготовка металевої поверхні спрямована на видалення оксидів, жирових забруднень і вологи, якщо вони заважають одержанню якісного з'єднання. Для електродних покриттів і порошкових дротів важливе дотримання визначених виробником умов зберігання та підготовки; хімічну причину цього добре ілюструє ризик надходження водню з вологи. Однак лекція не встановлює універсальних температур сушіння чи строків зберігання: для конкретної марки застосовують чинну технологічну документацію.

7.3. Послідовність аналізу причин пористості

Якщо у навчальному прикладі виявлено пористість, спочатку описують можливі джерела газу, після цього перевіряють стан поверхні й витратних матеріалів, далі — захист і умови тверднення. Окремо потрібно розглянути газоподібні продукти окисно-відновних реакцій, зокрема СО у сталевій ванні. Остаточну причину дефекту визначають за сукупністю результатів контролю, а не лише за теоретичним переліком реакцій.

Таке пояснення є підготовкою до тем про газові суміші, флюси, електроди та формування складу металу шва.

Джерела розділу: [1, розд. 4, 6, 10].

8. Узагальнення та питання для самоперевірки

8.1. Що потрібно засвоїти

Газометалеві взаємодії у зварювальній ванні починаються з надходження газу до реакційної зони. Кисень окиснює метали і легувальні елементи, азот може розчинятися та утворювати нітриди, водень здатний розчинятися в металі й частково виділятися під час охолодження. Можливі дефекти формуються лише за певного поєднання хімічних, теплових і часових умов.

Для професійної підготовки ФМБ достатньо вміти пояснити походження основних небажаних компонентів, записати прості рівняння окиснення та назвати хімічні заходи обмеження їх надходження. Точний прогноз вмісту газів або розрахунок схильності до тріщин потребує спеціалізованих досліджень та даних, які виходять за рамки курсу загальної хімії.

8.2. Зв'язок із наступною темою

Під час формування металу шва змінюється співвідношення основного й присадного металів, відбуваються газометалеві та шлакометалеві реакції, частина елементів вигоряє або додатково вводиться. Наступна лекція поєднає ці процеси в простий матеріальний баланс із чітко заданими припущеннями.

Питання для самоперевірки

1. Які можливі джерела кисню в зоні зварювання?
2. Чим відрізняється розчинений газ від утвореного оксиду або нітриду?
3. Чому надходження азоту залежить від умов газового захисту?
4. Назвіть основні джерела водню.
5. Як газові бульбашки можуть утворювати пори?
6. Чому для встановлення причини дефекту недостатньо одного хімічного рівняння?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 3–6, 10–11.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про сполуки Оксигену та Нітрогену.

[3] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про водень і властивості газів.

[4] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми про неорганічні речовини та їхні реакції.

ТЕМА 15

ФОРМУВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ МЕТАЛУ ЗВАРНОГО ШВА

1. Формування хімічного складу металу шва

Мета лекції. Пояснити, з яких джерел надходять елементи до металу шва та чому кінцевий склад може відрізнятися від складу основного й присадного металів; навчити складати простий матеріальний баланс.

План лекції

1. Джерела металу шва. 2. Частка основного металу. 3. Змішування й розрахунок концентрацій. 4. Окиснення та засвоєння елементів. 5. Легування і рафінування. 6. Навчальна схема розрахунку.

1.1. З яких складових утворюється метал шва

Метал зварного шва формується насамперед із розплавленої частини основного металу та присадного матеріалу. За певних способів зварювання додаткові металеві компоненти можуть надходити з електродного покриття, порошкового дроту або металевих добавок у флюсі. Одночасно частина вихідних елементів окиснюється чи випаровується, а інша залишається у складі твердого металу. Отже, вихідна суміш і готовий шов не завжди мають тотожні масові частки компонентів.

У навчальному курсі спочатку розглядаємо найпростішу модель змішування основного та присадного металів без реакцій і втрат. Лише після цього додаємо задані поправки на вигорання або надходження металевих компонентів. Такий порядок дозволяє перевірити закон збереження маси та зрозуміти, звідки походить кожна величина у формулі.

1.2. Склад — важлива, але не єдина характеристика

Хімічний аналіз показує середній вміст елементів, але сам по собі не описує їхній розподіл між ділянками шва, форму неметалевих включень або мікроструктуру після кристалізації. Для оцінювання експлуатаційних властивостей з'єднання потрібна сукупність характеристик. У межах дисципліни «Хімія» зосереджуємось саме на походженні й кількісному балансі хімічних елементів.

Джерела розділу: [1, розд. 1, 8–10].

2. Частка основного металу та присадки

2.1. Поняття частки участі основного металу

Частка основного металу в металі шва залежить від того, скільки металу кромки розплавилася та змішалася з присадкою. Для простої навчальної моделі можна задати маси обох складових. Тоді частку основного металу обчислюють як його масу, поділену на загальну масу металевої суміші. Частка присадки дорівнює різниці між одиницею та часткою основного металу.

$$\gamma = m_{осн} / (m_{осн} + m_{прис}) \quad (15.1)$$

$$1 - \gamma = m_{прис} / (m_{осн} + m_{прис}) \quad (15.2)$$

2.2. Навіщо цей показник потрібен для хімічного складу

Якщо основний і присадний метали мають різні масові частки певного елемента, збільшення участі однієї складової змінює початкову концентрацію цього елемента в суміші. Наприклад, присадний матеріал може містити більше марганцю, ніж основний метал. За іншої частки проплавлення вихідна частка Мп в металі шва також буде іншою, навіть коли склад обох металів не змінився.

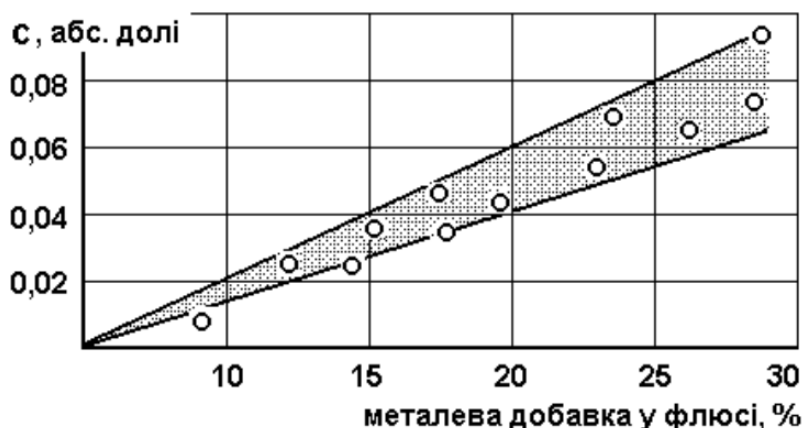


Рис. 15.1. Приклад залежності вмісту легувального компонента від металевих добавок

Графік із джерела ілюструє вплив металевих добавок за конкретних умов дослідження; він не є універсальною залежністю для будь-якого сплаву чи способу зварювання. У навчальному розрахунку частку основного металу задають безпосередньо або визначають із вихідних мас. Фактичну частку в готовому шві встановлюють за технологічними даними.

Джерела розділу: [1, розд. 8.1.2].

3. Проста формула змішування елементів

3.1. Закон збереження маси

Нехай масова частка певного елемента у вихідному основному металі дорівнює w_1 , у присадному — w_2 , а маси цих металів становлять m_1 і m_2 . Маса елемента в початковій суміші дорівнює сумі його мас в обох джерелах. Поділивши результат на загальну масу суміші, дістанемо формулу початкової середньої масової частки за припущення відсутності реакцій, втрат і додаткового надходження металу.

$$m(E) = m_1 w_1(E) + m_2 w_2(E) \quad (15.3)$$

$$w_0(E) = [m_1 w_1(E) + m_2 w_2(E)] / (m_1 + m_2) \quad (15.4)$$

Якщо користуються часткою основного металу γ , ту саму залежність можна записати через частки участі двох джерел. Формула придатна для окремого розрахунку вуглецю, марганцю, кремнію чи іншого елемента за умови, що всі початкові масові частки вказано однаково: у десяткових дробах або у відсотках із належним перерахунком.

$$w_0(E) = \gamma \cdot w_1(E) + (1 - \gamma) \cdot w_2(E) \quad (15.5)$$

3.2. Перевірка відповіді

За відсутності додаткових джерел і втрат підсумкова частка елемента не може бути більшою за більшу вихідну частку або меншою за меншу вихідну частку. Якщо результат виходить за ці межі, необхідно перевірити одиниці й арифметику. Загальна маса суміші також має дорівнювати сумі мас вихідних металевих складових.

Таблиця 15.1. Контрольні запитання для розрахунку

Що відоме?	Що визначаємо?	Як перевірити?
Маси металів	Частки їхньої участі	Сума часток = 1
Масова частка елемента	Його маса в кожній складовій	Маса елемента $\leq$ маси складової
Сумарна маса елемента	Початкову частку в суміші	Між вихідними частками

Джерела розділу: [1, розд. 8.1.2]; [2, тема 8.4]. [3, розд. про легувальні елементи]

4. Вигорання та інші втрати елементів

4.1. Як окиснення змінює склад

У реакційній зоні частина компонентів металевої суміші може окиснюватися. Особливо важливо відстежувати елементи, здатні зв'язувати кисень і утворювати оксиди, які переходять до шлаку. Якщо з вихідної металевої фази вибула певна маса кремнію або марганцю, маса цього елемента в готовому металі зменшиться. Для коректного розрахунку потрібно також урахувати, як змінилася загальна маса металевої фази.

4.2. Умовний коефіцієнт переходу

Для простих навчальних розрахунків викладач може задати частку елемента, що залишилася в металі після відповідних реакцій, або коефіцієнт переходу. Тоді масу елемента в кінцевій металевій фазі знаходять множенням його початкової маси на заданий коефіцієнт. Але коефіцієнти не можна приймати довільно як універсальні: у виробництві вони залежать від конкретних матеріалів, способу й умов зварювання.

$$m_{\text{зал}}(E) = k_{\text{пер}}(E) \cdot m_{\text{поч}}(E) \quad (15.6)$$

Якщо разом із певним елементом із металевої фази вибувають оксиди, загальну масу шва за потреби уточнюють через відповідний матеріальний баланс. У більшості базових завдань зміною загальної маси можуть знехтувати, але це припущення потрібно записати прямо. Інакше числовий результат створюватиме помилкове враження повного прогнозу кінцевого складу.

4.3. Випаровування

За високих температур окремі елементи можуть частково переходити в газову фазу. Однак масштаб втрат визначається конкретною системою і тепловими умовами. Немає

підстав призначати однаковий відсоток випаровування всім металам. Якщо для навчальної задачі такий відсоток потрібен, його надають як окрему вихідну величину й не подають як норматив для реального процесу.

Джерела розділу: [1, розд. 3.3, 8.1].

5. Легування металу шва та додаткові джерела елементів

5.1. Звідки може надходити легувальний компонент

Легувальний елемент може бути у складі основного металу, присадного дроту або металевих добавок у покритті електрода чи флюсі. Для деяких способів зварювання можливе надходження компонента внаслідок взаємодії шлаку й металу. Кожен шлях має власні особливості, тому підсумковий розрахунок потребує інформації не лише про вихідну масу добавки, а й про частку, яка фактично засвоїлася металевою фазою.

5.2. Матеріальний баланс із додатковою добавкою

Якщо в навчальній задачі задано масу додаткової металевої речовини та масову частку потрібного елемента в ній, спочатку визначають його вхідну масу. Далі використовують заданий коефіцієнт переходу, щоб знайти засвоєну кількість. Її додають до маси елемента, що надходить із основного й присадного металів. Загальну масу металу в знаменнику обирають відповідно до прийнятої умови: вона може змінитися, якщо частина добавки реально перейшла у металеву фазу.

$$m_{\text{дод}}(E) = m_{\text{добавки}} \cdot w_{\text{добавки}}(E) \quad (15.7)$$

$$m_{\text{засв}}(E) = k_{\text{пер}} \cdot m_{\text{дод}}(E) \quad (15.8)$$

Для рівня ФМБ достатньо використовувати одну додаткову складову за раз. Розрахунки для багатьох одночасних джерел із взаємозалежними коефіцієнтами належать до поглибленого вивчення металургії зварювання. Важливо, щоб студент розумів фізичний зміст кожної маси та не плував масу всієї добавки з масою легувального елемента в ній.

Таблиця 15.2. Джерела елемента в металі шва

Джерело	Що потрібно знати	Що може змінити результат
Основний метал	Маса та склад	Частка проплавлення
Присадний метал	Маса та склад	Окиснення або випаровування
Металева добавка	Маса та вміст елемента	Коефіцієнт засвоєння

Джерела розділу: [1, розд. 8.1.2–8.1.4]. [4, розд. про кількісні закони]

6. Рафінування та небажані домішки

6.1. Сірка і фосфор у металі шва

До небажаних домішок у багатьох сталевих зварних швах належать сірка й фосфор, якщо їхній вміст або розподіл виходить за межі, допустимі для конкретного матеріалу. Вони можуть впливати на технологічні й експлуатаційні властивості зварного з'єднання, зокрема на

схильність до деяких видів тріщиноутворення. Точні допустимі вмісти визначають вимогами до марки металу та застосовними стандартами.

6.2. Перехід домішок між фазами

Рафінуванням називають сукупність процесів, спрямованих на зменшення вмісту небажаних компонентів у металевій фазі. Під час зварювання певні реакції можуть сприяти переходу частини домішок у неметалеву фазу. Але можливість та повнота такого переходу залежать від складу шлаку, температури, активності речовин і тривалості контакту. Сам факт наявності шлакового покриття не гарантує повного очищення металу шва.

6.3. Чому важливі неметалеві включення

Розкиснення й рафінування можуть утворювати оксиди або інші неметалеві продукти. Для формування якісного шва частина таких продуктів повинна відокремитися від металу. Частинки, що залишилися після тверднення, впливають на властивості залежно від їхніх розмірів, форми, кількості та розташування. Тому кінцева якість з'єднання не визначається лише середнім хімічним складом, навіть якщо розрахункові відсотки елементів збігаються з очікуваними.

У курсі загальної хімії достатньо якісно пов'язати реакції окиснення, розкиснення та очищення з перенесенням компонентів між металом, шлаком і газом. Детальні рівноважні моделі рафінування в навчальну практичну роботу не включаємо.

Джерела розділу: [1, розд. 7–8, 10–11].

7. Повний спрощений баланс для навчальної практичної

7.1. Послідовність розрахунків

Для прикладного завдання можна задати маси основного металу й присадки, вміст вуглецю, марганцю та кремнію в кожному джерелі, а також частку переходу одного з легувальних елементів до шва. Спочатку студент обчислює масу кожного елемента у двох вихідних металах. Після цього підсумовує її, визначає початкові масові частки та окремо враховує задані втрати. Підсумкову частку знаходять за прийнятою масою металевої фази.

7.2. Чому потрібні явні припущення

Розрахунок слід супроводжувати коротким переліком прийнятих умов. Наприклад: втратами загальної маси металу знехтувати; додаткових джерел легування немає; маси основного й присадного металів задані; коефіцієнт переходу застосовується лише до марганцю. Якщо припущення не записані, перевірити правильність формули важко, а готова числова відповідь може бути неправильно витлумачена.

$$w_{\text{кін}}(E) = m_{\text{кін}}(E) / m_{\text{кін}}(\text{металу}) \quad (15.9)$$

Для зручності результат оформлюють таблицею з колонками «основний метал», «присадний метал», «сумарно до реакцій», «зміна внаслідок реакцій», «залишок у шві». Усі маси повинні мати однакові одиниці. Після обчислення виконують перевірку: маса окремого

компонента не перевищує загальної маси металу, а масові частки мають фізично можливі значення.

Таблиця 15.3. Приклад структури розрахункової таблиці

Елемент	До реакцій	Зміна	Після реакцій
C	Маса з двох джерел	Задана або 0	Залишок
Mn	Маса з двох джерел	Задані втрати	Залишок
Si	Маса з двох джерел	Задане засвоєння або втрати	Залишок

Джерела розділу: [1, розд. 8.1]; [2, розд. 8.4].

8. Узагальнення: від вихідних матеріалів до готового шва

8.1. Причинно-наслідкова схема

Формування хімічного складу металу зварного шва починається зі змішування основного й присадного металів. Далі на металеву суміш впливають газометалеві та шлакометалеві реакції, можливе випаровування частини елементів, засвоєння металевих добавок та перехід домішок до неметалевої фази. Кінцевий середній склад можна кількісно оцінити лише тоді, коли для кожного суттєвого процесу надано необхідні вихідні дані.

8.2. Навчальна модель і виробнича реальність

Просте змішування за масовими частками — основа першого етапу практичної підготовки. Його перевага полягає в прозорості матеріального балансу; головне обмеження — відсутність хімічних і фізичних втрат. На другому етапі за спеціально заданим коефіцієнтом можна врахувати один процес і зрозуміти, як саме він змінює результат. Отримане значення не слід застосовувати як промисловий прогноз без уточнення матеріалів, технології та фактичних показників переходу елементів.

Для майбутнього фахового молодшого бакалавра важливо вміти прочитати хімічний склад матеріалів, обчислити кількість окремих елементів, пояснити можливі шляхи їхнього переходу між фазами та правильно зазначити межі простого розрахунку. Ці знання є хімічною основою для наступних тем про захисні гази, флюси, електродні покриття та виникнення дефектів металу шва.

Питання для самоперевірки

1. З яких металевих джерел формується склад шва?
2. Що називають часткою основного металу?
3. Як розрахувати початкову масову частку елемента в суміші?
4. Чим коефіцієнт переходу відрізняється від масової частки?
5. Якими шляхами елемент може потрапити у шлак?

6. Чому розрахований склад не дозволяє повністю оцінити механічні властивості шва?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 3, 5, 7–10.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Розд. 8.4.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про хімічні властивості легувальних елементів.

[4] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи про кількісні співвідношення.

ТЕМА 16

ЗАХИСНІ ГАЗИ ТА ГАЗОВІ СУМІШІ У ЗВАРЮВАННІ

1. Призначення захисного газового середовища

Мета лекції. З'ясувати, як захисні гази відокремлюють зварювальну ванну від атмосферного повітря, чим відрізняються інертні й активні гази та які прості розрахунки застосовують для газових сумішей.

План лекції

1. Газовий захист і його завдання. 2. Інертні та активні гази. 3. Хімічні процеси в CO_2 . 4. Газові суміші й розрахунок їх складу. 5. Витрата захисного газу. 6. Вплив середовища на метал шва.

1.1. Для чого відокремлювати метал від повітря

Під час зварювання плавленням краплі електродного металу і поверхня рідкої ванни мають високу температуру. Контакт із атмосферою створює умови для поглинання кисню й азоту, а за наявності вологи — і водню. Наслідки таких взаємодій розглянуто в попередніх лекціях; тепер важливо показати, яким способом штучна газова атмосфера змінює контакт металу з повітрям.

Газовим захистом називають подачу спеціально підібраного газу або суміші безпосередньо в реакційну зону. Потік відтісняє повітря біля дуги і ванни. Однак одного факту подачі газу недостатньо: захист має охоплювати зону розплаву, а склад середовища повинен відповідати властивостям зварюваного металу.

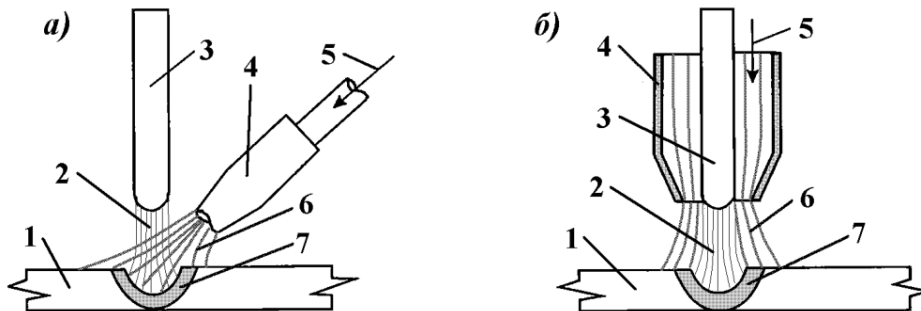


Рис. 16.1. Принцип подачі захисного середовища до зварювальної зони (історичні схеми)

Захисне середовище може надходити з сопла пальника або утворюватися під час розкладу компонентів покриття чи порошкового дроту. У першому випадку склад задається подачею ззовні, у другому — хімічним складом зварювального матеріалу. Газовий та газошлаковий захист не слід ототожнювати: шлак додатково ізолює розплав і бере участь у хімічних взаємодіях.

Джерела розділу: [1, розд. 4, 6.1–6.3].

2. Інертні гази та їх застосування

2.1. Аргон і гелій

Інертні гази цінні насамперед тим, що за звичайних умов не вступають у хімічну взаємодію з металом шва. Для зварювання використовують, зокрема, аргон Ar та гелій He. Вони створюють атмосферу, у якій розплавлений метал менше контактує з киснем, азотом і вологою навколишнього повітря.

Аргон і гелій не можна називати розкиснювачами. Розкиснення — це хімічне зв'язування кисню з утворенням продукту реакції; інертний газ виконує переважно фізичну захисну функцію. Якщо на поверхні деталі вже є оксидна плівка, сама подача аргону не означає її видалення.

2.2. Чому для різних металів вибирають різні середовища

Умови газового захисту пов'язані з хімічною активністю матеріалу. Для металів, схильних інтенсивно утворювати оксиди, важливо обмежити надходження кисню. Під час зварювання алюмінію та його сплавів газове середовище має запобігати повторному окисненню очищеної поверхні; під час зварювання сталі можливе застосування не лише інертних, а й активних захисних газів.

Таблиця 16.1. Хімічний характер поширених захисних газів

Газ	Хімічний характер	Основна роль
Аргон (Ar)	Інертний	Фізичне витіснення повітря
Гелій (He)	Інертний	Фізичне витіснення повітря
Вуглекислий газ (CO ₂)	Активний	Захист від повітря зі зміною складу газової фази при нагріванні
Суміші Ar + CO ₂	Поєднання інертного та активного компонентів	Керування складом захисної атмосфери

Хімічну характеристику газу не слід плутати з технологічним результатом: форма шва, стабільність дуги й ступінь розбризкування залежать не лише від хімічного складу, а й від способу зварювання та його режиму. У цій лекції зосередимося на хімічній ролі газу.

Джерела розділу: [1, розд. 6.2]; [2, розд. 1, 3]. [4, розд. про властивості газів]

3. Активний захисний газ: вуглекислий газ

3.1. Що відбувається з CO₂ поблизу дуги

Вуглекислий газ застосовують як захисне середовище під час зварювання сталей. На відміну від аргону, за високої температури він може частково розкладатися. Для хімічного

пояснення використовують спрощений запис утворення чадного газу та активного кисню; реальний склад гарячої газової фази залежить від температури й умов процесу.



Активний кисень здатний окиснювати залізо й компоненти металевих розплавів. Тому назва «захисний газ» не означає, що газ хімічно байдужий до металу. Фізичне витіснення повітря може одночасно супроводжуватися окиснювальною дією окремих частинок самого захисного середовища.

3.2. Роль розкиснювачів у зварювальному дроті

У сталевих дротах для роботи в активних середовищах передбачають компоненти, здатні зв'язувати кисень, зокрема марганець і кремній. У простій моделі їхня дія описується утворенням оксидів. Продукти реакції мають, за сприятливих умов, перейти до неметалевої фази, а не залишитися включеннями в шві.



Наведені реакції ілюструють хімічний принцип розкиснення; вони не встановлюють точного вмісту кисню після зварювання. Для прогнозу виробничих результатів потрібні дані про склад дроту, спосіб перенесення металу та реальні умови газового захисту.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3, 6.2, 8.1].

4. Газові суміші та способи вираження їх складу

4.1. Об'ємна частка компонента

У виробництві використовують як індивідуальні гази, так і їхні суміші. На початковому рівні склад суміші зручно задавати об'ємною часткою компонента за однакових температури та тиску. Наприклад, якщо для навчальної задачі задано суміш $\text{Ar}-\text{CO}_2$ із певними відсотками, сумарний об'єм обох складових дорівнює загальному об'єму суміші.

$$\varphi_i = V_i / V_{\text{сум}} \quad (16.4)$$

Тут φ_i — об'ємна частка компонента, V_i — його об'єм, $V_{\text{сум}}$ — загальний об'єм. Якщо частку подано у відсотках, для розрахунку потрібно поділити її на сто. Сума часток усіх компонентів правильно заданої суміші дорівнює одиниці, або ста відсоткам.

$$V_i = \varphi_i \cdot V_{\text{сум}} \quad (16.5)$$

4.2. Матеріальний баланс під час змішування

Для приготування суміші з двох газів окремо визначають необхідні об'єми кожного компонента, після чого перевіряють суму. У навчальній моделі припускають однакові температуру й тиск газів до і після змішування. У реальній газовій апаратурі показання приладів, температура та робочий тиск можуть вимагати уточнення.

Таблиця 16.2. Послідовність простого розрахунку суміші

Етап	Відомі дані	Результат
1	Загальна витрата суміші	Загальний об'єм
2	Об'ємна частка Ar	Потрібний об'єм Ar
3	Об'ємна частка CO ₂	Потрібний об'єм CO ₂
4	Обидва об'єми	Перевірка їхньої суми

Не можна механічно підміняти об'ємні відсотки масовими: за однакових умов однакові об'єми аргону й вуглекислого газу мають різні маси. Для перерахунку потрібні молярні маси або густини та чітко визначені умови.

Джерела розділу: [1, розд. 6.2]; [3, тема 6.2]. [5, розд. про газові закони]

5. Витрата газу та тривалість його подачі

5.1. Розрахунок об'єму за витратою

Під час планування навчальної операції витрату захисного газу можуть задати в літрах за хвилину, а тривалість зварювання — у хвилинах. За сталої витрати загальний об'єм знаходять множенням цих величин. Це базовий матеріальний баланс, який не потребує складних газодинамічних моделей.

$$V_{\text{сум}} = q \cdot t \quad (16.6)$$

Якщо в умові зазначено додаткову подачу газу до запалювання дуги або після її згасання, тривалість потрібно розглядати як суму відповідних інтервалів. Проте тривалість попередньої та заключної подачі залежить від конкретного технологічного процесу й не може бути однаковою довільно призначеною величиною.

5.2. Обсяг газу для кількох зварних з'єднань

Якщо кілька операцій виконують за різних установлених витрат, загальну потребу визначають підсумовуванням окремих об'ємів. Коли передбачений технологічний резерв, його величину задають в умові навчальної задачі. Результат стосується лише розрахованої операції, а не повного проекту газового господарства підприємства.

$$V_{\text{заг}} = \sum(q_j \cdot t_j) \quad (16.7)$$

Зберігання стиснених газів і переведення показників балона до робочих умов — окрема тема, що вимагає коректного врахування тиску, температури та властивостей газу. Просте множення геометричного об'єму балона на показник манометра не слід подавати як точний універсальний метод.

Джерела розділу: [1, розд. 6.2]; [3, розд. «Розчини»].

6. Якість захисту та небажані домішки

6.1. Порушення захисної атмосфери

Коли до зварювальної зони потрапляє повітря, захисний ефект зменшується незалежно від складу газу в балоні. Можливими причинами є неправильне охоплення зони потоком, підсмоктування атмосферного повітря та порушення герметичності газоподавального тракту. Тому правильний розрахунок об'єму ще не гарантує належного захисту металу.

Особливого значення набуває волога. Вона може бути на кромках, у захисному газі або в компонентах зварювальних матеріалів. У гарячій реакційній зоні її перетворення створюють можливість надходження водню в метал, що за певних умов підвищує ризик пороутворення та утворення тріщин.

6.2. Зв'язок газового середовища з дефектами

Кисень може окиснювати елементи металу і збільшувати кількість оксидних продуктів. Азот і водень за відповідних умов розчиняються у рідкому металі; під час кристалізації та охолодження їхня поведінка змінюється. Пори, включення та тріщини мають різні причини, тому за їхньою появою не можна встановлювати склад газової фази без додаткових даних.

Таблиця 16.3. Небажаний компонент і можлива хімічна дія

Компонент	Можлива дія	Що перевіряють
O ₂	Окиснення складових металу	Охоплення ванни захистом
N ₂	Поглинання азоту	Контакт із повітрям
H ₂ O	Джерело водню	Сухість газу й підготовку поверхні

Джерела розділу: [1, розд. 4–6, 10–11].

7. Добір захисного середовища за хімічними ознаками

7.1. Порівняння газів без універсального рейтингу

Вибір захисного середовища залежить від металу й мети операції. Хімічно активний вуглекислий газ може використовуватися для вуглецевих сталей у поєднанні з дротом відповідного складу. Аргон або інші інертні середовища застосовують там, де потрібно обмежити взаємодію рідкого металу з газовими компонентами. Суміші дозволяють поєднувати ці властивості в різних співвідношеннях.

Відокремимо хімічні умови від суто технологічних. Хімічний курс пояснює, чи може газ окиснювати метал, чи сприяє утворенню оксидів, як захист пов'язаний із потраплянням азоту та водню. Стабільність дуги, режим перенесення крапель і точні налаштування обладнання встановлюють у профільних зварювальних дисциплінах.

7.2. Умовна ситуація для розбору

Нехай необхідно виконати два зварних з'єднання з різних матеріалів. Для кожного задано газове середовище та склад присадного матеріалу. Послідовність хімічного аналізу така: встановити, чи є газ інертним; з'ясувати можливі продукти розпаду активного газу; визначити, які елементи у присадці здатні зв'язувати кисень; перевірити, чи буде контакт із повітрям достатньо обмежений у прийнятій схемі.

Такий аналіз не замінює технологічної карти. Він пояснює причинно-наслідковий зв'язок між газовою атмосферою, хімічними реакціями та можливими змінами складу металу шва. Для виробничого призначення конкретної газової суміші потрібні дані про марку металу та чинні технологічні вимоги.

Джерела розділу: [1, розд. 6.2, 8]; [2, розд. «Метали»].

8. Узагальнення та контроль розуміння

8.1. Що повинен засвоїти майбутній фахівець

Газовий захист має дві пов'язані сторони: фізичне витіснення повітря та хімічні властивості самих захисних газів. Інертний газ переважно ізолює метал від атмосфери, а активний може одночасно змінювати склад гарячої газової фази. Для зварювання сталей важлива узгодженість газового середовища та складу присадного металу, зокрема наявність розкиснювачів у відповідних матеріалах.

Об'ємні частки газової суміші й сумарна витрата — величини, які студент може впевнено розраховувати вже після вивчення загальної хімії. У такому розрахунку необхідно перевірити однаковість умов для об'ємів, одиниці часу, суму часток і коректність заданих допущень.

8.2. Підготовка до практичної роботи

До практичної роботи про гази треба повторити закон об'ємних відношень, визначення кількості речовини, поняття об'ємної частки та правила урівнювання хімічних рівнянь. Окремо потрібно вміти розрізняти хімічну функцію газу та його технологічну витрату. Жоден із простих розрахунків не встановлює сам собою допустимий режим зварювання або вимоги безпеки до балонів.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає фізичний принцип газового захисту?
2. Чим інертний газ відрізняється від активного?
3. Які частинки можуть утворюватися під час розпаду CO_2 ?
4. Для чого у присадний метал вводять Mn і Si?
5. Як визначити об'єм кожного газу за відсотковим складом суміші?
6. Чому витрата газу не гарантує відсутності пор?

Використані джерела

- [1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–6, 8.
- [2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про властивості елементів та їх сполук.
- [3] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6.
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про властивості газів.
- [5] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи про газові суміші та стехіометрію.

ТЕМА 17

ГОРЮЧІ ГАЗИ ТА ХІМІЯ ПРОЦЕСІВ ГАЗОВОГО ЗВАРЮВАННЯ І РІЗАННЯ

1. Горючі гази як хімічне джерело теплоти

Мета лекції. Охарактеризувати горючі гази, пояснити хімічні реакції їх згоряння та засвоїти найпростіші розрахунки об'ємів реагентів і продуктів газового зварювання та різання.

План лекції

1. Горючі гази та окисник. 2. Ацетилен і кисень. 3. Стадійність горіння. 4. Інші газоподібні палива. 5. Стехіометрія газових сумішей. 6. Тепловий ефект. 7. Вплив продуктів згоряння на метал.

1.1. Чому газове полум'я може нагрівати метал

Газове зварювання використовує теплоту, що виділяється під час хімічної реакції горючого газу з окисником. У порівнянні з електричною дугою джерело енергії тут безпосередньо хімічне. Для розуміння процесу необхідно розрізнити об'єм поданого палива, кількість кисню та склад продуктів реакції.

У зварювальному виробництві розглядають ацетилен C_2H_2 , а також інші гази, зокрема метан CH_4 і пропан C_3H_8 . Властивості та застосовність конкретного палива визначають його склад, тепловий ефект, умови горіння та особливості технологічного обладнання. Жоден із цих показників не можна вивести лише з того, що речовина є «газом».

1.2. Паливо й окисник — різні учасники реакції

Горючий газ постачає хімічну енергію, а кисень забезпечує процес окиснення. За недостатньої кількості кисню продукти реакції можуть відрізнитися від продуктів повного згоряння. Для хімічних розрахунків завжди потрібно вказувати, яку саме реакцію — повну чи неповну — розглядають.

Таблиця 17.1. Газоподібні горючі речовини

Газ	Формула	Продукти повного горіння
Ацетилен	C_2H_2	CO_2 і H_2O
Метан	CH_4	CO_2 і H_2O
Пропан	C_3H_8	CO_2 і H_2O

Джерела розділу: [1, розд. 2, 6.2]; [2, тема 10.4].

2. Хімічне рівняння повного згоряння ацетилену

2.1. Вихідні речовини та продукти

Ацетилен містить Карбон і Гідроген. Під час його повного згоряння в кисні Карбон переходить до CO_2 , а Гідроген — до H_2O . Коефіцієнти рівняння визначають за збереженням

числа атомів кожного елемента; вони одночасно відображають мольні та, за однакових умов, об'ємні співвідношення газоподібних учасників.



За записаним рівнянням на дві молекули ацетилену припадає п'ять молекул кисню. У перерахунку на один моль ацетилену теоретична потреба становить два з половиною молі O_2 . Якщо гази вимірюють за однакових температури й тиску, відповідне співвідношення справедливе і для їхніх об'ємів.

$$n(\text{O}_2) / n(\text{C}_2\text{H}_2) = 5 / 2 \quad (17.2)$$

За використання газових об'ємів необхідно чітко фіксувати умови вимірювання. Наприклад, запис «1 м³ газу» без зазначення умов може бути недостатнім для зіставлення даних за різних температур і тисків. Під час початкових навчальних розрахунків вважатимемо всі об'єми приведеними до однакових умов.

2.2. Що означає теплота Q

Символ Q показує, що реакція згоряння екзотермічна. Однак саме рівняння без числового значення теплоти не дає змоги визначити, скільки енергії фактично перейде до нагріваної деталі. Для такого розрахунку потрібні заданий тепловий ефект і обрана спрощена модель теплопередачі.

Джерела розділу: [1, розд. 2.3, 6.2].

3. Стадійність горіння та склад полум'я

3.1. Чому продукти першої стадії можуть бути неповними

Газове полум'я не є однорідною сумішшю з однаковою температурою й хімічним складом у всіх його частинах. У внутрішній реакційній зоні за обмеженої кількості кисню можуть утворюватися CO і H_2 . Після надходження додаткового кисню ці речовини здатні окиснюватися далі. У навчальному курсі цю послідовність зручно показати двома врівноваженими рівняннями.



Сума двох наведених рівнянь відповідає повному згорянню ацетилену. У реальному полум'ї склад проміжних частинок і температурний розподіл складніші; наведена схема потрібна для розуміння матеріального балансу, а не для точного розрахунку структури полум'я.

3.2. Окиснювальний і відновний характер середовища

Надлишок окисника та надлишок горючого газу створюють різні хімічні умови поблизу поверхні металу. Присутність активного кисню сприяє окисненню, тоді як середовище з CO і H_2 може виявляти відновні властивості щодо окремих оксидів. Це не означає, що для будь-якого сплаву існує однакове оптимальне співвідношення газів.

Практичні режими та характер полум'я визначають у технології зварювання. На занятті з хімії достатньо пояснити, чому зміна співвідношення палива й кисню може змінювати склад навколишніх газів та інтенсивність окисно-відновних взаємодій.

Джерела розділу: [1, розд. 2, 6.2]; [3, розд. «Хімічна термодинаміка»]. [4, розд. про термохімію]

4. Інші горючі гази: метан і пропан

4.1. Повне горіння метану

Метан — основний горючий компонент багатьох природних газів. Як і ацетилен, він при повному згорянні утворює вуглекислий газ і воду. Кількісний розрахунок виконують за окремим врівноваженим рівнянням; співвідношення кисню та палива не слід механічно переносити з реакції ацетилену на метан.



Рис. 17.1. Полум'я газового палива: приклад реакції горіння (не схема зварювального пальника)

4.2. Повне горіння пропану

Пропан C_3H_8 містить три атоми Карбону й вісім атомів Гідрогену в молекулі. Щоб встановити його потребу в кисні, спочатку зрівнюють число атомів Карбону, потім Гідрогену і наприкінці Оксигену. Такий спосіб зручний для всіх простих вуглеводневих палив.



Для газового різання важливим є не лише нагрівання полум'ям, а й окиснення нагрітого металу спрямованим потоком кисню. Хімічна частина процесу включає реакції заліза з утворенням оксидів. Точний склад оксидів і перебіг різання залежать від температури та умов подачі кисню; одна навчальна реакція не описує всіх механізмів різання.



Останнє рівняння — спрощений стехіометричний приклад одного з можливих процесів окиснення заліза, а не єдина реакція газового різання. Необхідно уникати підміни всієї технології цією формулою.

Джерела розділу: [2, тема 10.4]; [1, розд. 6.2]. [5, розд. про реакції горіння]

5. Об'ємні співвідношення та теоретична потреба в кисні

5.1. Закон об'ємних відношень

Для газоподібних реагентів за однакових температури й тиску об'єми співвідносяться як стехіометричні коефіцієнти рівняння. Тому для повного згоряння заданого об'єму ацетилену можна безпосередньо використати співвідношення 5:2 для кисню та ацетилену. Перш ніж підставляти числа, слід переконатися, що реакція врівноважена правильно.

$$V_{\text{теор}}(\text{O}_2) = (5 / 2) \cdot V(\text{C}_2\text{H}_2) \quad (17.8)$$

Якщо потрібно визначити об'єм продуктів, окремо записують кількість CO_2 і водяної пари за рівнянням. Однак після охолодження водяна пара може частково конденсуватися, тому фактичний об'єм охолоджених продуктів не обов'язково дорівнюватиме сумі гарячих газових об'ємів. Такі умови в навчальній задачі потрібно зазначати.

5.2. Надлишок кисню

Для розрахункових вправ може бути задано надлишок кисню як частку від теоретичної потреби. Тоді визначають фактичний обсяг подачі, але не роблять висновків про правильність реального налаштування обладнання. Значення надлишку завжди беруть із умови, а не встановлюють довільно як норматив.

$$V_{\text{факт}}(\text{O}_2) = V_{\text{теор}}(\text{O}_2) \cdot (1 + \alpha) \quad (17.9)$$

Таблиця 17.2. Типові величини для стехіометричних вправ

Позначення	Зміст	Одиниця
$V(\text{C}_2\text{H}_2)$	Об'єм ацетилену	л або м^3
$V_{\text{теор}}(\text{O}_2)$	Теоретичний об'єм кисню	та сама одиниця
α	Заданий надлишок кисню	частка одиниці
$V_{\text{факт}}(\text{O}_2)$	Об'єм фактично поданого кисню	л або м^3

Джерела розділу: [1, розд. 2, 6.2]; [2, тема 10].

6. Тепловий ефект згоряння та корисна енергія

6.1. Хімічна енергія й нагрівання деталі

Реакція згоряння виділяє енергію завдяки утворенню нових хімічних зв'язків у продуктах. Для кількісного розрахунку теплового ефекту використовують термохімічні дані, що відповідають певному агрегатному стану продуктів і прийнятим умовам. Без цих даних можна встановити стехіометрію, але не точну кількість виділеної теплоти.

Якщо задано теплоту згоряння на один моль палива, загальне теоретичне виділення теплоти визначають множенням питомої величини на кількість речовини. Слід перевіряти знак теплового ефекту: для екзотермічної реакції ентальпія реакції від'ємна, хоча виділена кількість теплоти як додатна величина може записуватися через модуль.

$$Q_{\text{вид}} = n_{\text{палива}} \cdot |\Delta H_{\text{згор}}| \quad (17.10)$$

6.2. Корисна частина теплоти

Полум'я нагріває не лише метал, а й навколишнє середовище. Для спрощеної навчальної моделі викладач може задати частку теплоти, що надходить до виробу. За жодних обставин її не слід трактувати як універсальну ефективність для всіх пальників, палив і способів роботи.

$$Q_{\text{кор}} = \eta \cdot Q_{\text{вид}} \quad (17.11)$$

Для перевірки відповіді корисна теплота в такій моделі не може перевищувати всю виділену теплоту. Якщо результат виходить більшим, варто перевірити, чи правильно перетворено відсотки на десяткові частки, а також одиниці кількості речовини й теплоти.

Джерела розділу: [1, розд. 2.3]; [3, розд. «Термохімія»].

7. Газове середовище, метал шва та безпечні умови

7.1. Продукти згоряння та можливі реакції

Газова оболонка полум'я певною мірою відокремлює розплав від повітря. Але CO_2 і водяна пара — не інертні гази: за високих температур вони можуть брати участь у реакціях, а їхні продукти розпаду впливають на хімічний стан зварювальної ванни. Вода є потенційним джерелом водню, а надходження активного кисню може сприяти утворенню оксидів металу.

Важливо розрізняти дві ситуації: вплив газів на ще рідкий метал і вплив продуктів горіння на вже охолоджений шов. Розчинення газів і подальша кристалізація належать до першої групи явищ; корозія готової конструкції — до другої. Обидва процеси пов'язані з хімією, але потребують різних способів аналізу.

7.2. Основні небезпеки газового процесу

Горючі гази утворюють пожежо- та вибухонебезпечні суміші за певних умов. Кисень підтримує горіння, але сам не є паливом. Чадний газ токсичний, і його утворення під час неповного згоряння — окрема причина для належної вентиляції та контролю робочого середовища.

У цій лекції розглядаються лише хімічні основи; конкретні правила для балонів, редукторів, пальників і вентиляції визначаються актуальними інструкціями з охорони праці та виробничою документацією. Навчальні об'ємні розрахунки не замінюють оцінювання вибухопожежної небезпеки.

Джерела розділу: [1, розд. 6.2]; [2, тема 10].

8. Узагальнення розрахункових прийомів

8.1. Послідовність розв'язання типового завдання

Спочатку записують формулу горючого газу та врівноважене рівняння його повного згоряння. Далі встановлюють, який об'єм або кількість речовини палива задано. Зі

стехіометричних коефіцієнтів визначають теоретичну потребу в кисні й обсяги продуктів; якщо задача передбачає заданий надлишок, враховують його лише на наступному етапі.

Для енергетичної частини доцільно окремо знайти теоретичну виділену теплоту й корисну теплоту, що передається виробу. Такий поділ не дає помилково прирівняти весь хімічний тепловий ефект до фактичного нагрівання металу. Кожну відповідь слід супроводжувати одиницею вимірювання і коротким поясненням прийнятих умов.

8.2. Що залишається за межами хімічної моделі

Наведені співвідношення допомагають зрозуміти хімію газового зварювання і різання, однак не розраховують будову реального полум'я, швидкість різання, вибір обладнання або потрібну витрату газу для конкретного шва. Ці питання потребують окремих технологічних даних і вивчаються в професійних дисциплінах.

Питання для самоперевірки

1. Чим газове зварювання відрізняється від електродугового за джерелом теплоти?
2. Запишіть рівняння повного згоряння ацетилену.
3. Чому продукти першої й другої стадій горіння можуть відрізнитися?
4. Як за об'ємом палива визначити теоретичну потребу в кисні?
5. Чим теплота згоряння відрізняється від корисної теплоти?
6. Чому CO та H_2 потребують уваги під час аналізу полум'я?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 2.3, 6.2.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 10 «Паливні матеріали».

[3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4 «Елементи хімічної термодинаміки».

[4] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи з термохімії.

[5] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про реакції горіння.

ТЕМА 18

ЕЛЕКТРОДНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПОКРИТТЯ ЕЛЕКТРОДІВ: СКЛАД І ФУНКЦІЇ КОМПОНЕНТІВ

1. Електрод як джерело металу та захисних речовин

Мета лекції. Розглянути хімічні функції металевго стрижня й покриття електрода, основні групи компонентів покриття та прості матеріальні розрахунки.

План лекції

1. Будова покритого електрода. 2. Хімічні функції покриття. 3. Мінеральні компоненти. 4. Газоутворення. 5. Основні типи покриттів. 6. Розкиснення та легування. 7. Матеріальний баланс покриття.

1.1. Дві складові покритого електрода

Покритий зварювальний електрод має металевий стрижень і зовнішнє покриття певного складу. Під час горіння дуги стрижень плавиться та постачає метал для формування шва. Покриття також нагрівається, плавиться або розкладається, внаслідок чого в реакційну зону надходять гази, шлакоутворюючі речовини й за потреби легувальні компоненти.

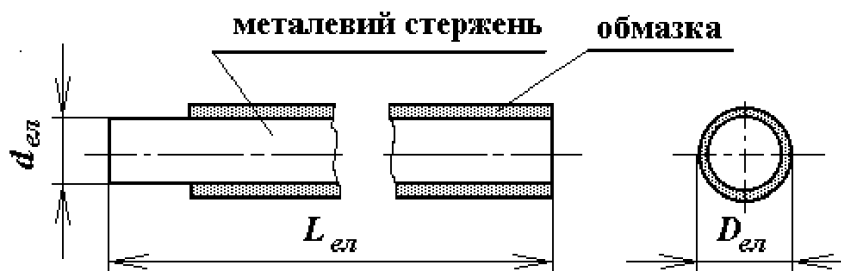


Рис. 18.1. Будова покритого електрода: металевий стрижень і зовнішнє покриття

Хімічний склад покриття визначає не лише склад шлаку, а й захисну атмосферу та особливості взаємодії з металом. Тому слова «покриття електрода» не слід сприймати як назву пасивної ізоляційної оболонки: її речовини є учасниками хімічних процесів.

1.2. Взаємозв'язок трьох фаз

У зоні дуги одночасно взаємодіють металева, газова та шлакова фази. Частина складників покриття може утворювати гази, інша — переходити до шлаку. Феросплавні добавки здатні впливати на вміст окремих елементів у металі шва. Для правильного аналізу кожного компонента необхідно встановити його основну функцію, а не лише хімічну формулу.

Джерела розділу: [1, розд. 6.3, 7–8].

2. Функціональні групи компонентів покриття

2.1. Чому одне покриття містить різні речовини

Під час виготовлення покриття підбирають суміш мінералів, органічних речовин, феросплавів і зв'язувальних добавок. Кожна група забезпечує певне завдання, але межі між

групами не завжди жорсткі: карбонат може бути джерелом газу й оксиду для шлаку, а деякі мінерали одночасно впливають на склад та властивості шлакової фази.

Таблиця 18.1. Основні хімічні функції речовин покриття

Група	Приклади	Основна роль
Газоутворювачі	CaCO_3 , целюлоза	Утворення захисного газового середовища
Шлакоутворювачі	TiO_2 , SiO_2 , CaF_2	Формування захисної неметалевої фази
Розкиснювачі	Феромарганець, феросиліцій	Зв'язування кисню в металі
Стабілізуючі добавки	K_2CO_3 , Na_2CO_3	Сприяння стійкому горінню дуги
Зв'язувальні речовини	Рідке скло	Формування й утримання покриття

2.2. Покриття — хімічна система

У процесі нагрівання окремі компоненти можуть змінювати агрегатний стан, взаємодіяти між собою або з рідким металом. Для прикладу, оксиди та фториди входять до складу утвореної неметалевої фази, а продукти термічного розкладу карбонатів беруть участь у формуванні газової оболонки.

Під час навчання важливо не приписувати кожній речовині лише одну функцію без уточнення контексту. Фактичний склад промислового покриття залежить від марки електрода та технологічного призначення; наведена таблиця подає групи речовин для хімічного пояснення, а не рецептуру конкретного виробу.

Джерела розділу: [1, розд. 6.3.1–6.3.2].

3. Газоутворюючі речовини та карбонати

3.1. Розклад кальцій карбонату

Кальцій карбонат CaCO_3 за нагрівання може розкладатися на кальцій оксид і вуглекислий газ. У покритті це дає одночасно газоподібний компонент захисного середовища та оксидний компонент шлакової фази. Умови фактичного розкладу залежать від температури й парціального тиску CO_2 , але для початкового розрахунку достатньо врівноваженого рівняння.



З одного моля CaCO_3 за повного розкладу утворюється один моль CO_2 . Маса оксиду кальцію і маса газу в сумі дорівнюють масі карбонату, якщо всі складові враховано в одних одиницях. Таку перевірку можна використати для контролю власного розрахунку.

$$n(\text{CO}_2) = m(\text{CaCO}_3) / M(\text{CaCO}_3) \quad (18.2)$$

3.2. Органічні газотворювачі

Целюлоза, крохмаль та споріднені органічні речовини за високотемпературного розкладу й окиснення утворюють газові продукти. Їхній реальний склад залежить від умов реакції, тому загальну схему не можна без додаткових відомостей перетворити на точний кількісний баланс усіх продуктів.

Газова оболонка перешкоджає контакту розплаву з атмосферою, але наявність водяної пари в реакційній зоні вимагає уваги до можливого надходження водню в метал. Тому виділення великого об'єму газу не означає автоматично найкращий захист за будь-яких умов.

Джерела розділу: [1, розд. 3.1.4, 4.3, 6.3]. [4, розд. про оксиди]

4. Мінеральні типи електродних покриттів

4.1. Рудно-кислі та рутилові покриття

Рудно-кислі покриття ґрунтуються на природних мінеральних компонентах, зокрема на сполуках марганцю, кремнію й титану. Їхня роль пов'язана переважно з утворенням шлакової фази; додаткові органічні компоненти можуть доповнювати шлаковий захист газовим.

Рутилові покриття містять титан(IV) оксид TiO_2 як характерний мінеральний компонент. До складу можуть додавати інші шлакоутворюючі, газотворюючі, розкиснювальні та зв'язувальні речовини. Виробничі рецептури різняться, тому сам термін «рутилове» не визначає точної масової частки кожного інгредієнта.

4.2. Фтористо-кальцієві покриття

Для фтористо-кальцієвих, або основних, покриттів характерні карбонати кальцію та кальцій фторид CaF_2 . Під час нагрівання карбонат утворює CO_2 і CaO , тоді як CaF_2 бере участь у формуванні шлакової фази. Розкиснювачі й зв'язувальні компоненти добирають відповідно до необхідних властивостей електрода.

Таблиця 18.2. Характерні основи різних типів покриття

Тип покриття	Поширена основа	Переважна роль
Рудно-кисле	Мінеральні руди та оксиди	Шлаковий захист
Рутилове	TiO_2	Газошлаковий захист
Фтористо-кальцієве	CaCO_3 та CaF_2	Газошлаковий захист
Органічне	Целюлоза та інші органічні речовини	Переважно газовий захист

Порівняння стосується лише хімічної основи. Експлуатаційні характеристики та сфери застосування конкретних електродів визначають за їхнім маркуванням і технічною документацією.

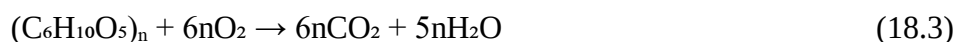
Джерела розділу: [1, розд. 6.3.2].

5. Органічні покриття та волога

5.1. Роль целюлози

У покриттях органічного типу важливими газоутворюючими компонентами є целюлоза й інші органічні речовини. Під дією тепла вони розкладаються і формують газове середовище, яке відтісняє атмосферне повітря. На відміну від мінеральних покриттів із переважним шлаковим захистом, тут головним механізмом може бути газоутворення.

Хімічно целюлоза складається з повторюваних ланок, що містять атоми Карбону, Гідрогену та Оксигену. Її спрощену формулу корисно знати для пояснення того, чому під час окиснення можуть утворюватися CO_2 і H_2O . Але реальний процес у дузі багатостадійний і не обмежується одним рівнянням повного згоряння.



5.2. Чому важлива підготовка покриття

Залежно від складу покриття й технології надмірна волога може стати небажаним джерелом водню в зоні зварювання. Для електродів, до яких встановлено спеціальні вимоги щодо зволоження, важливо додержуватися режимів зберігання та підготовки, зазначених виробником. Не слід самостійно призначати температуру прожарювання лише за хімічним типом покриття.

Здатність покриття давати багато захисного газу й низький вміст дифузійного водню у шві — не тотожні показники. Студент повинен пояснювати їх як різні наслідки складу та перебігу процесів у гарячій зоні.

Джерела розділу: [1, розд. 4.3, 6.2–6.3].

6. Розкиснення та перенесення легувальних компонентів

6.1. Чому до покриття вводять феросплави

Металеві добавки в електродному покритті можуть містити марганець, кремній та інші елементи. За певних умов вони зв'язують кисень і утворюють оксиди, частина яких відокремлюється разом зі шлаком. Той самий елемент може частково засвоюватися металом шва; співвідношення процесів залежить від конкретних умов.



Рівняння ілюструють принцип відновлення заліза з його оксиду та утворення оксидів активніших елементів. Для отримання числової маси розкиснювача потрібно знати, яку масу FeO розглядають і яку частку компонента реально витрачають на відповідну реакцію.

6.2. Залишковий склад металу

Якщо феросплав містить задану масову частку марганцю або кремнію, можна визначити масу цього елемента у внесений добавці. Але не весь внесений елемент обов'язково

потрапить до металу шва: частина може окиснитися або залишитися у неметалевій фазі. Тому в навчальній задачі коефіцієнт засвоєння слід надавати окремо.

$$m_{засв}(E) = m_{добавки} \cdot w(E) \cdot k_{засв} \quad (18.6)$$

Такий розрахунок є спрощеним масовим балансом. Він придатний для закріплення загальної хімії, але без фактичних коефіцієнтів і даних про шлак не може служити прогнозом властивостей реального електрода.

Джерела розділу: [1, розд. 5, 8]. [5, розд. про кількісні розрахунки]

7. Розрахунок складу та маси електродного покриття

7.1. Масова частка інгредієнта

Для навчального завдання склад умовного покриття задають масовими частками його компонентів. Якщо задано масу сухого покриття одного електрода, масу певного інгредієнта обчислюють множенням на відповідну частку. Усі частки повинні давати в сумі одиницю, а маси — сумарну масу сухого покриття.

$$m_i = w_i \cdot m_{покp} \quad (18.7)$$

Якщо партія містить певну кількість однакових електродів, потребу в сухому компоненті знаходять множенням його маси в одному покритті на кількість електродів. У практичних задачах додатково можуть задати технологічні втрати сировини, але їхній відсоток має бути частиною умови.

7.2. Маса металевго стрижня і покриття

У масовому балансі електрода слід відрізнати масу стрижня, масу покриття та загальну масу виробу. Помилка виникає, коли частку речовини, зазначену для сухого покриття, множать на повну масу електрода. Це різні основи відліку, і вони мають бути чітко підписані в таблиці.

$$m_{ел} = m_{стрижня} + m_{покp} \quad (18.8)$$

Таблиця 18.3. Контроль простого балансу

Об'єкт	Потрібні дані	Перевірка
Один електрод	Маса стрижня й покриття	Сума дає повну масу
Сухе покриття	Частки всіх компонентів	Сума часток дорівнює 1
Партія електродів	Кількість і склад одного	Маси масштабуються однаково

Джерела розділу: [1, розд. 6.3, 8.1].

8. Підсумок і підготовка до практичних розрахунків

8.1. Зв'язок складу покриття з металургією шва

Покриття електрода — багатокомпонентна система, складові якої виконують газоутворюючу, шлакоутворюючу, розкиснювальну, легувальну, стабілізуючу та формувальну функції. Окремі речовини можуть поєднувати кілька функцій. Для розуміння

виробничого процесу важливо встановити, як кожен компонент поводить себе при нагріванні й до якої фази потрапляють продукти його перетворення.

З погляду загальної хімії основними прийомами залишаються складання рівнянь реакцій, визначення масової частки, розрахунків за кількістю речовини й перевірка матеріального балансу. На цьому рівні студенти мають уміти пояснити, для чого до покриття вводять карбонати, оксиди та феросплави, не відтворюючи складні промислові рецептури.

8.2. Межі простих розрахунків

Навчальні масові баланси дозволяють обчислити потребу в компонентах умовного покриття, але не визначають самі по собі стабільність дуги, механічні властивості шва або точний склад продуктів розкладу. Ці показники залежать від технології й установлених випробувань; у разі виробничого використання слід користуватися документацією на конкретні електроди.

Питання для самоперевірки

1. З яких частин складається покритий електрод?
2. Які головні групи компонентів входять до покриття?
3. Які продукти утворюються під час розкладу CaCO_3 ?
4. Чим відрізняються рутилові та фтористо-кальцієві покриття за хімічною основою?
5. Яку роль виконують феромарганець і феросиліцій?
6. Як визначити масу окремого компонента в партії електродів?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–6, 8.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про неорганічні сполуки металів.

[3] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 4, 8.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про неорганічні сполуки металів.

[5] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії: для лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХП», 2017. Завдання з кількісних розрахунків і властивостей сполук.

ТЕМА 19

ЗВАРЮВАЛЬНІ ФЛЮСИ ТА ШЛАКИ: СКЛАД, ВЛАСТИВОСТІ ТА ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ

1. Зварювальний флюс і шлакова фаза

Мета лекції. Пояснити хімічні функції флюсів і шлаків під час зварювання, розрізнати їхній склад та властивості, засвоїти основи простих масових балансів.

План лекції

1. Призначення флюсу. 2. Способи виготовлення. 3. Кислотні й основні оксиди. 4. Властивості шлаку. 5. Реакції на межі шлак–метал. 6. Захист зварювальної ванни. 7. Розрахунок складу флюсу.

1.1. Чим відрізняються флюс і шлак

Флюс — це зварювальний матеріал, який вводять у зону зварювання для формування захисного середовища та виконання інших фізико-хімічних функцій. Шлак — неметалева фаза, що виникає після розплавлення компонентів флюсу або електродного покриття і внаслідок реакцій з участю металу та газів. Тому вихідний флюс і утворений шлак можуть мати різний хімічний склад.

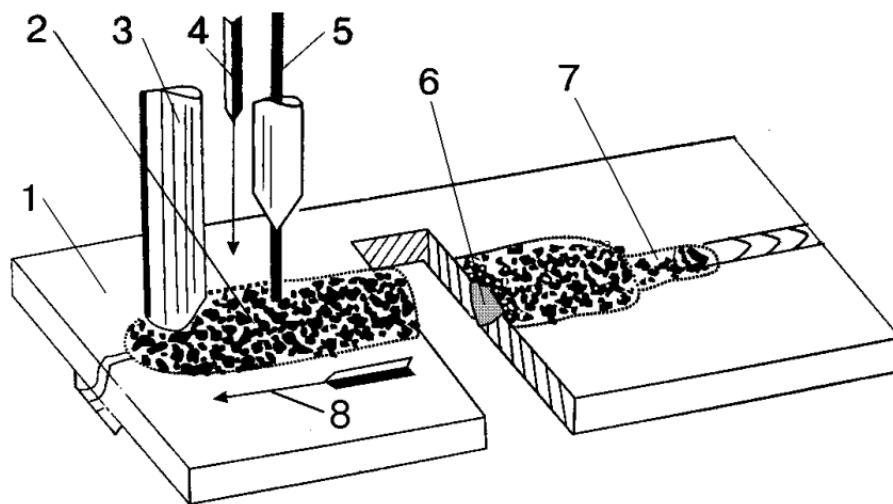


Рис. 19.1. Схема подачі флюсу та утворення шлакової фази під час зварювання

За зварювання під флюсом шар гранульованого матеріалу відокремлює дугу й рідкий метал від повітря. Розплавлений шлак утворює захисний покрив над ванною, а під шаром флюсу існує газова порожнина. Хімічні реакції між металом, шлаком і газом можуть одночасно змінювати склад кожної з цих фаз.

1.2. Чому це тема саме з хімії

Під час роботи важливо розуміти не тільки геометрію шару флюсу, а й роль оксидів, фторидів, карбонатів та металевих добавок. Одні компоненти створюють шлакову фазу, інші сприяють виділенню газу або змінюють хімічний склад металу шва.

Джерела розділу: [1, розд. 6.4, 7.1].

2. Хімічний склад і способи виготовлення флюсів

2.1. Плавлені та неплавлені флюси

За способом виготовлення розрізняють плавлені, керамічні та інші різновиди флюсів. Плавлені одержують розплавленням суміші компонентів із подальшою грануляцією. Керамічні формують із порошкових речовин, які перемішують зі зв'язувальними добавками, а потім гранулюють. У деяких технологіях суміш додатково спікають.

Спосіб виготовлення має хімічне значення. Якщо суміш попередньо розплавляють, компоненти зазнають високотемпературних взаємодій ще до використання. Якщо гранули утворюють із порошкової суміші без повного переплавлення, у готовому матеріалі можуть зберігатися окремі функціональні добавки, зокрема феросплави.

Таблиця 19.1. Основні різновиди флюсів за виготовленням

Вид	Принцип виготовлення	Особливість складу
Плавлений	Переплавлення суміші й грануляція	Компоненти проходять високотемпературну обробку
Керамічний	Змішування порошків зі зв'язувальною речовиною	Можливе введення металевих добавок
Спечений	Формування гранул і подальше спікання	Компоненти зазнають додаткового нагрівання

2.2. Головні групи інгредієнтів

До флюсів можуть входити SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , TiO_2 , CaF_2 та інші мінеральні компоненти. Неплавлені флюси можуть також містити зв'язувальні речовини й феросплави для зміни складу металу. Перелік є прикладом хімічних груп, а не рецептурою будь-якої конкретної марки.

Джерела розділу: [1, розд. 7.1.1–7.1.2].

3. Кислотні й основні оксиди у складі шлаку

3.1. Не всі оксиди виконують однакову функцію

До кислотних оксидів належить, зокрема, SiO_2 , а CaO і MgO проявляють основні властивості. Оксиди з різним кислотно-основним характером здатні взаємодіяти між собою, утворюючи складніші сполуки. У шлаковій фазі ці закономірності поєднуються з властивостями високотемпературного розплаву.



Рівняння ілюструє можливість утворення силікату кальцію. Реальні зварювальні шлаки зазвичай містять кілька оксидів, тому їхню будову не можна описати як один-єдиний продукт наведеної реакції. Важливим є співвідношення оксидів у всій суміші.

3.2. Поняття про основність флюсу

Співвідношення основних і кислотних компонентів використовують для характеристики флюсів. Однак у фаховій літературі існують різні способи обчислення показника основності; його значення залежить від обраної формули. Тому будь-який навчальний розрахунок цього показника повинен містити чітко заданий вираз.

Для рівня ФМБ достатньо визначати маси й масові частки основних та кислотних оксидів і пояснювати, що зміна їхнього співвідношення впливає на властивості шлаку. Не слід видавати одну довільно прийняту формулу основності за загальноприйнятий норматив для всіх матеріалів.

Таблиця 19.2. Приклади компонентів шлакової суміші

Речовина	Хімічна характеристика	Роль у суміші
SiO ₂	Кислотний оксид	Силікатна складова
CaO	Основний оксид	Оксидна складова
MgO	Основний оксид	Оксидна складова
Al ₂ O ₃	Амфотерний оксид	Компонент складної оксидної фази

Джерела розділу: [1, розд. 7.1–7.2]; [2, тема 4]. [3, розд. про оксиди]

4. Фізико-хімічні властивості шлаків

4.1. В'язкість, густина і змочування

Рідкий шлак захищає метал від газової атмосфери лише тоді, коли може утворити відповідний покрив над розплавом. На поведінку шлакової фази впливають густина, в'язкість, поверхневий та міжфазний натяг. Ці властивості залежать від хімічного складу й температури, тому дві суміші з різними оксидами можуть поводитися по-різному за однакової зовнішньої схеми зварювання.



Рис. 19.2. Ілюстрація впливу властивостей шлаку на форму поверхні зварного шва

В'язкість характеризує опір рідини течії. Вона впливає на здатність шлаку розтікатися, покривати ванну й відокремлюватися після тверднення. Міжфазний натяг відображає властивості границі між двома фазами, наприклад шлаком і металом. Він впливає на контакт між ними та на перенесення речовини.

4.2. Чому не можна оцінити флюс лише за формулою оксиду

Окремий компонент може впливати на властивості суміші інакше, ніж у чистому стані. Зміна одного інгредієнта здатна змінити температуру плавлення, текучість або особливості взаємодії з металом. Саме тому властивості реального шлаку визначають для конкретної системи, а не додають механічно довідкові характеристики чистих оксидів.

Джерела розділу: [1, розд. 7.2–7.3]. [4, розд. про основні та кислотні оксиди]

5. Хімічні реакції на межі шлак–метал

5.1. Перехід оксидів між фазами

Метал і шлак контактують через спільну міжфазну поверхню. За певних умов оксиди металів можуть переходити до шлаку або взаємодіяти з елементами металевої фази. Водночас введені розкиснювачі здатні відновлювати залізо з FeO з утворенням власних оксидів.



У простій моделі марганець і кремній зв'язують кисень, а продукти реакцій беруть участь у формуванні неметалевої фази. Реальне співвідношення реакцій залежить від складу металу і шлаку та температури. Тому рівняння показують можливі напрями хімічних перетворень, але не визначають автоматично вихід кожного продукту.

5.2. Очищення розплаву та включення

Відокремлення неметалевих продуктів від металевої ванни є важливою умовою формування якісного шва. Якщо оксидні частинки залишаються у затверділому металі, вони стають неметалевими включеннями. Кількість таких включень і їхній вплив не можна обчислити лише за загальною масою утворених оксидів: потрібно знати, яка частина продуктів реально перейшла до шлаку.

Зварювальний флюс, таким чином, виконує не тільки захисну, а й фізико-хімічну функцію: створює фазу, з якою контактує розплав та до якої за відповідних умов можуть перейти деякі продукти реакцій.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3, 7.4, 8].

6. Захисний шар флюсу та газова порожнина

6.1. Як формується замкнена реакційна зона

Під шаром флюсу теплота дуги розплавляє частину зернистого матеріалу. Навколо дуги може утворюватися газова порожнина, а над зварювальною ванною — шлаковий покрив. Газова й шлакова фази разом перешкоджають прямому контакту рідкого металу з повітрям, але одночасно самі взаємодіють із розплавом.

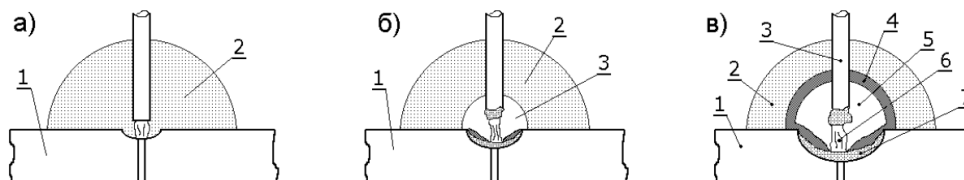


Рис. 19.3. Стадії утворення газової порожнини під шаром флюсу

Для хімічної оцінки важливо встановити, звідки береться газова фаза. Вона може включати продукти випаровування металу та компонентів флюсу, а також продукти хімічних реакцій. Однак точний склад газів без спеціальних даних про флюс і умови процесу визначити не можна.

6.2. Наслідки порушення захисту

Якщо шлаковий покрив або газова ізоляція не охоплюють рідкий метал, посилюється контакт ванни з атмосферою. Тоді можливе додаткове окиснення й надходження азоту та водню. Тому у виробництві властивості флюсу оцінюють у поєднанні з конкретним способом і режимом зварювання.

Під час початкового вивчення достатньо простежити послідовність: вихідний флюс — розплавлення — газова й шлакова фази — взаємодія з металом — твердий шлак і готовий шов.

Джерела розділу: [1, розд. 6.4, 7.1].

7. Матеріальний баланс компонентів флюсу

7.1. Масові частки інгредієнтів

Для навчальної практичної склад умовного флюсу задають у масових відсотках оксидів або інших компонентів. За відомої загальної маси суміші масу кожного інгредієнта знаходять множенням на його частку, записану десятковим дробом. Сума мас усіх інгредієнтів повинна дорівнювати загальній масі флюсу.

$$m_i = m_{\text{флюсу}} \cdot w_i \quad (19.4)$$

Якщо в умовній суміші міститься карбонат кальцію, за заданого повного розкладу можна обчислити теоретичну масу утвореного CaO та CO₂. Важливо не додавати масу цих продуктів до вихідної маси карбонату повторно: продукти вже містять атоми, що були у вихідному компоненті.

$$m(\text{CaO}) = m(\text{CaCO}_3) \cdot M(\text{CaO}) / M(\text{CaCO}_3) \quad (19.5)$$

7.2. Шлак після реакцій — не те саме, що початковий флюс

Реальна маса шлаку змінюється під час випаровування, розкладу, надходження оксидів із металу та відокремлення частини неметалевих продуктів. Тому обчислення кінцевої маси потребує окремих даних про кожен суттєвий процес. У навчальній моделі припущення про повний або неповний перехід речовин слід указувати прямо.

Таблиця 19.3. Як перевіряти навчальний баланс

Етап	Що обчислюють	Що перевіряють
Вихідна суміш	Маси компонентів	Сума дорівнює масі флюсу
Хімічна реакція	Маси продуктів	Збереження маси
Умовний шлак	Маси залишених компонентів	Не враховують гази як складову шлаку

Джерела розділу: [1, розд. 3, 7]; [2, теми 1, 4].

8. Узагальнення та контрольні запитання

8.1. Що потрібно розуміти про флюси

Зварювальний флюс є вихідною багатокомпонентною сумішшю, а шлак — результатом її розплавлення та пов'язаних із ним хімічних перетворень. Характер флюсу пов'язаний зі способом виготовлення, вмістом кислотних і основних оксидів, наявністю спеціальних добавок та його поведінкою під час нагрівання. Властивості рідкого шлаку впливають на захист і взаємодію з металом зварювальної ванни.

Для майбутнього фахового молодшого бакалавра найважливіше правильно розрізняти поняття «флюс» і «шлак», пояснювати роль оксидів та феросплавів і виконувати базові масові розрахунки за складом суміші. Складні теорії структури шлаків і термодинамічні розрахунки міжфазної рівноваги залишаються поза межами цієї теми.

8.2. Перехід до теми зварювального дроту

Дріт може постачати у ванну не лише метал основи, а й легувальні та розкиснювальні елементи. У порошкових дротах захисні й металургійні речовини додатково містяться всередині металевої оболонки. Отже, для наступної теми треба зберегти розуміння трьох фаз реакційної зони — металевої, газової та шлакової.

Питання для самоперевірки

1. Що називають флюсом і чим він відрізняється від шлаку?
2. Які компоненти можна віднести до кислотних і основних оксидів?
3. Чим відрізняються плавлені й керамічні флюси?
4. Як в'язкість впливає на поведінку шлаку?
5. Які реакції ілюструють розкиснення металу в контакті зі шлаком?
6. Чому кінцеву масу шлаку не можна завжди прирівнювати до маси початкового флюсу?

Використані джерела

- [1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 5–8.
- [2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 1, 4.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про оксиди металів.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про основні та кислотні оксиди.

ТЕМА 20

ЗВАРЮВАЛЬНИЙ І ПОРОШКОВИЙ ДРІТ: ХІМІЧНИЙ СКЛАД, ЛЕГУВАННЯ ТА РОЗКИСНЕННЯ

1. Зварювальний дріт як джерело хімічних елементів

Мета лекції. Розглянути суцільний та порошковий зварювальний дріт як джерела металу, розкиснювачів, легувальних і захисних речовин; навчитися складати прості матеріальні баланси їхніх компонентів.

План лекції

1. Суцільний і порошковий дріт. 2. Хімічний склад суцільного дроту. 3. Оболонка та осердя порошкового дроту. 4. Функції шихти. 5. Розкиснення і легування. 6. Масовий баланс компонентів. 7. Підготовка до практичних розрахунків.

1.1. Основні різновиди зварювального дроту

Суцільний дріт має порівняно однорідну металеву структуру на всьому перерізі. Він постачає до зварювальної ванни метал із певним умістом легувальних і розкиснювальних елементів. Порошковий дріт складається з металевої оболонки та внутрішньої шихти — суміші порошкоподібних речовин, хімічні функції яких залежать від типу дроту.

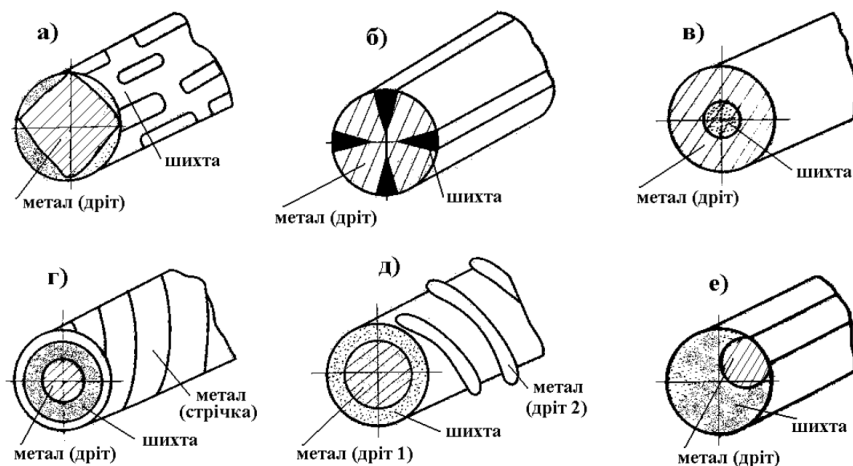


Рис. 20.1. Різновиди перерізу порошкового зварювального дроту

Важливо не плутати хімічний склад дроту з підсумковим складом металу шва. Між вихідним матеріалом і готовим швом відбуваються перенесення металу, нагрівання, окиснення, можливе надходження компонентів із основного металу та взаємодія з газовою і шлаковою фазами.

1.2. Хімічний і технологічний погляди

На лекції з хімії потрібно встановити, які елементи надходять із металевої частини дроту, що міститься в шихті та які реакції можуть змінити їхній вміст. Швидкість подачі, вибір діаметра й точні параметри дуги належать до спеціальних технологічних дисциплін.

Джерела розділу: [1, розд. 6.3.3, 8.1].

2. Хімічний склад суцільного сталевого дроту

2.1. Роль Карбону, Мангану та Силіцію

У сталевому зварювальному дроті можуть міститися Карбон, Манган, Силіцій та інші елементи в кількостях, передбачених маркою матеріалу. Вміст Карбону впливає на властивості сталі, а Манган і Силіцій за певних умов беруть участь у розкисненні металу. Для роботи в активних захисних середовищах наявність таких елементів має спеціальне значення.

Розглядаючи склад дроту, необхідно розрізняти масову частку елемента та масу цього елемента в конкретній кількості присадного матеріалу. Позначення в маркуванні не замінює даних сертифіката: для точних розрахунків беруть заданий або документально підтверджений хімічний склад.

2.2. Реакції розкиснення

Під час переходу металу в зварювальну ванну кисень може взаємодіяти з розкиснювальними компонентами дроту. У простому поданні марганець відновлює FeO до заліза з утворенням MnO, а кремній — з утворенням SiO₂. Утворені оксиди повинні за сприятливих умов перейти в неметалеву фазу.



Якщо в умові задачі задають певні втрати марганцю або кремнію, їх можна врахувати в масовому балансі. Але самі рівняння реакцій не дають відсотків переходу в метал шва; ці показники залежать від конкретного середовища та режиму.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3, 6.2, 8.1]; [2, тема 8]. [3, розд. про Манган]

3. Будова порошкового дроту та його осердя

3.1. Металева оболонка і шихта

Порошковий дріт поєднує металеву оболонку та внутрішню суміш порошкових компонентів. Оболонка бере участь у формуванні наплавленого металу, а шихта може забезпечувати газоутворення, утворення шлаку, розкиснення й легування. За хімічною функцією ці речовини подібні до окремих компонентів покриття електрода або зварювального флюсу.

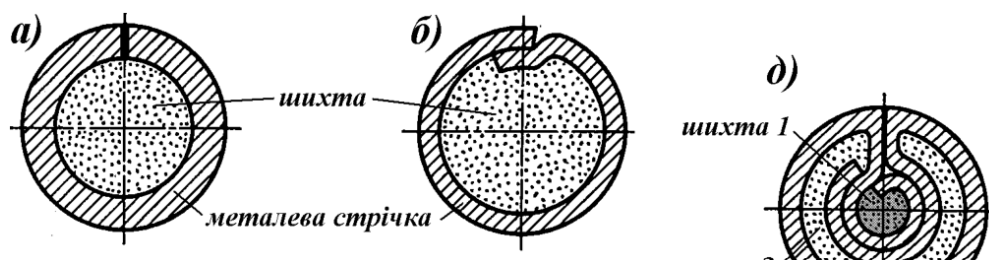


Рис. 20.2. Приклади конфігурацій металевої оболонки та заповнення порошкового дроту

Різні конструкції порошкового дроту забезпечують розміщення порошку всередині металевої частини. Однак зовнішня форма перерізу сама по собі не визначає хімічного складу шихти: для цього необхідно знати призначення й рецептуру конкретної марки матеріалу.

3.2. Чому осердя не можна вважати лише «наповнювачем»

Компоненти шихти можуть вступати в реакції або переходити до різних фаз. Карбонати при нагріванні виділяють гази, оксиди й фториди беруть участь у формуванні шлаку, а порошки металів і феросплави впливають на склад металу. Тому хімічний аналіз порошкового дроту починають із переліку речовин осердя та їхніх можливих функцій.

У навчальних розрахунках склад оболонки і шихти зручно обліковувати окремо, а загальну масу дроту — як суму цих двох складових.

Джерела розділу: [1, розд. 3.1.4, 6.3.3].

4. Функції газо- і шлакоутворюючих складових шихти

4.1. Карбонати як джерело газу

До шихти порошкового дроту можуть додавати карбонати, що під час нагрівання розкладаються з виділенням CO_2 . Утворений газ бере участь у захисті гарячої зони від навколишнього повітря, а оксид, що залишається після розкладу, може входити до шлакової фази.



Для простого розрахунку маси газу необхідно знати масу карбонату і ступінь його розкладу. Якщо останній не заданий, без додаткових умов можна визначити лише теоретичний вихід за припущення повного перетворення.

4.2. Мінеральні й металеві компоненти

У шихті можуть бути присутні TiO_2 , SiO_2 , CaF_2 та інші мінеральні речовини, що беруть участь у формуванні шлакової фази. Феромарганець, феросиліцій та інші добавки можуть виконувати розкиснювальну й легувальну функції. У багатьох сумішах потрібно поєднати газове й шлакове укріплення металу.

Таблиця 20.1. Основні групи складових шихти

Група	Приклади	Хімічна функція
Газоутворювачі	CaCO_3 , органічні речовини	Формування газової оболонки
Шлакоутворювачі	TiO_2 , SiO_2 , CaF_2	Формування неметалевої фази
Розкиснювачі	Fe–Mn, Fe–Si	Зв'язування кисню
Металеві добавки	Залізний порошок, феросплави	Постачання металу або легувальних елементів

Джерела розділу: [1, розд. 6.3.3, 7–8].

5. Хімічні перетворення шихти під час зварювання

5.1. Реакції в газовій і шлаковій фазах

Коли порошковий дріт потрапляє до гарячої зони, його оболонка плавиться, а компоненти шихти нагріваються, розкладаються, плавляться або реагують. Гази утворюють локальне захисне середовище, а рідкі оксидні продукти беруть участь у формуванні шлакового покриву. Частина металевих добавок може перейти до рідкого металу.

Кількість газу не є єдиною ознакою якості захисту. За наявності вологи або невідповідного складу шихти можуть виникати небажані умови для поглинання водню чи утворення включень. Склад внутрішнього наповнення повинен розглядатися як система, у якій взаємодіють газоутворення, шлакоутворення та розкиснення.

5.2. Оксиди і можливість їх видалення

Якщо марганець і кремній окиснюються, утворені MnO та SiO_2 можуть перейти до шлаку. Для навчальної схеми це пояснює зв'язок між складом шихти і неметалевими продуктами. У реальному процесі частина включень може залишитися в металі, а точний баланс залежить від температури, контакту фаз і тривалості реакцій.

Окремо слід відзначити, що за певних умов у зварювальній ванні відбуваються реакції з участю вуглецю, які можуть призводити до виділення CO . Тому хімічний склад дроту та його шихти впливає і на газові процеси у зварювальній зоні.



Джерела розділу: [1, розд. 4–6, 10].

6. Масовий баланс оболонки та наповнювача

6.1. Визначення маси шихти

У найпростішій моделі повна маса відрізка порошкового дроту дорівнює сумі маси металевої оболонки та маси внутрішньої шихти. Якщо задана частка шихти, її масу знаходять множенням на масу дроту. Маса оболонки дорівнює різниці між загальною масою та масою шихти.

$$m_{др} = m_{об} + m_{ших} \quad (20.5)$$

$$m_{ших} = m_{др} \cdot w_{ших} \quad (20.6)$$

6.2. Вміст окремого компонента осердя

Масову частку окремої речовини можуть задавати відносно всієї маси дроту або лише відносно шихти. Ці два способи не можна змішувати. Якщо в умові зазначено відсоток $CaCO_3$ у шихті, спочатку обчислюють масу шихти, а вже потім — масу карбонату.

$$m(CaCO_3) = m_{ших} \cdot w_{ших}(CaCO_3) \quad (20.7)$$

Для металевої добавки діє та сама послідовність: маса феросплаву — масова частка потрібного елемента у феросплаві — теоретична маса цього елемента. Обчислення не гарантує, що весь елемент засвоїться металом шва.

Таблиця 20.2. Як не переплутати масові частки

Показник	Основа відліку	Перевірка
Частка шихти	Весь дріт	Не перевищує 1
Частка CaCO_3 у шихті	Маса шихти	Сума часток складників шихти = 1
Частка Mn у феросплаві	Маса феросплаву	Маса Mn не більша за масу феросплаву

Джерела розділу: [1, розд. 6.3.3, 8.1]. [4, розд. про кількісні співвідношення]

7. Втрати, засвоєння елементів і склад металу шва

7.1. Теоретична та фактична маса елемента

Якщо порошковий дріт містить легувальну добавку, її вихідний склад ще не дорівнює фактичному вмісту елемента у шві. Частина компонента може окиснюватися, випаровуватися або залишатися в неметалевій фазі. Для простих навчальних розрахунків допустимо задати коефіцієнт переходу, застосований лише до певного елемента.

$$m_{\text{засв}}(E) = m_{\text{вх}}(E) \cdot k_{\text{пер}}(E) \quad (20.8)$$

Знайдену масу засвоєного елемента потрібно додати до тієї його кількості, що надходить із інших джерел металу, а потім поділити на задану масу кінцевого металу шва. Якщо умова припускає незмінну загальну масу металу, таке припущення зазначають окремо.

7.2. Розрахунок витрат дроту

Для навчальної операції може бути задана необхідна маса наплавленого металу та коефіцієнт переходу металевої частини дроту. У такому разі вхідну масу дроту знаходять із рівняння матеріального балансу. Коефіцієнт потрібно брати з умови, а не вважати незмінним для всіх марок порошкового дроту або зварювальних процесів.

$$m_{\text{др,потр}} = m_{\text{напл}} / k_{\text{пер,мет}} \quad (20.9)$$

Важливо відрізнити перехід усієї маси дроту у наплавлений метал від переходу окремого легувального елемента. Для порошкового дроту ці величини можуть суттєво відрізнятися, адже частина шихти створює газову та шлакову фази.

Джерела розділу: [1, розд. 6.3.3, 8.1].

8. Узагальнення та контрольні запитання

8.1. Хімічна роль різних конструкцій дроту

Суцільний дріт насамперед постачає до ванни метал заданого хімічного складу. Порошковий дріт поєднує металеву оболонку й внутрішню шихту; її інгредієнти можуть формувати газове середовище, шлак, забезпечувати розкиснення та змінювати вміст легувальних елементів у шві. Отже, однакова загальна маса двох видів дроту не означає однакової маси металу, що перейде до зварної ванни.

Для розрахунків рівня ФМБ достатньо вміти визначати масу оболонки й шихти, кількість окремих компонентів наповнювача, теоретичні продукти заданих реакцій і масу елемента, засвоєного металом за спеціально наданим коефіцієнтом. Не слід підміняти цими наближеннями реальний технологічний розрахунок без фактичних даних.

8.2. Зв'язок із наступними темами

Розкиснювальні добавки, шлакоутворення та перехід легувальних елементів є складовими хімічної металургії зварювання. У подальших лекціях розглянемо, як пов'язати ці процеси із завершеним матеріальним балансом зварної ванни та з хімічними причинами можливих дефектів готового шва.

Питання для самоперевірки

1. Яка принципова відмінність суцільного й порошкового дроту?
2. Які функції може виконувати шихта порошкового дроту?
3. Які продукти дає розклад CaCO_3 ?
4. Чому Mn і Si вводять до зварювальних матеріалів?
5. Як обчислити масу шихти за її часткою у дроті?
6. Чому маса засвоєного елемента не завжди дорівнює його вхідній масі?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 3–6, 8.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 8 «Властивості металів. Корозія».

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Манган, Силіцій та Ферум.

[4] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи з кількісних розрахунків.

ТЕМА 21

ОСНОВИ ХІМІЧНОЇ МЕТАЛУРГІЇ ЗВАРЮВАННЯ: РОЗКИСНЕННЯ, ЛЕГУВАННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ МЕТАЛУ ШВА

1. Предмет хімічної металургії зварювання

Під час зварювання плавленням формується невелика, але хімічно активна реакційна зона. У ній одночасно контактують рідкий метал, газова фаза та, за наявності флюсу або покритого електрода, шлак. До ванни надходять основний метал, присадний матеріал і частина металевих добавок. Перебіг реакцій залежить від температури, складу середовища, характеру контакту фаз і тривалості існування розплаву.

Хімічною металургією зварювання називають сукупність процесів, що змінюють хімічний склад металу шва: окиснення, розкиснення, легування, перерозподіл домішок і рафінування. Це взаємопов'язані явища. Наприклад, доданий марганець може перейти до металу як легувальний елемент, а може окиснитися або зв'язати сірку. Тому лише відомості про масу присадки ще не визначають остаточний склад шва.

У цій темі розглядаємо хімічну суть процесів, а не добір режиму зварювання. Для розрахунків рівня фахового молодшого бакалавра достатньо засвоїти рівняння типових реакцій і принцип матеріального балансу: речовини та елементи не виникають і не зникають, а розподіляються між фазами.

Джерела розділу: [1, розд. 1, 5, 7–8].

2. Надходження кисню до металу та розкиснення

2.1. Чому розплавлений метал окиснюється

Кисень потрапляє до реакційної зони з атмосферного повітря, із захисного газу, якщо він містить активні компоненти, та з оксидів на зварюваній поверхні або в шлаку. У залізовмісному розплаві частина кисню пов'язується у сполуки заліза. Накопичення кисню та оксидів може погіршувати властивості майбутнього шва і сприяти утворенню неметалевих включень.



2.2. Що означає розкиснення

Розкисненням називають зв'язування кисню речовинами, які за відповідних умов мають вищу спорідненість до нього, ніж розплавлений метал, що захищають. У сталевих зварювальних матеріалах часто використовують марганець і кремній. Продуктами реакцій є оксиди, які за сприятливих умов переходять у шлакову фазу.



Наведені рівняння показують напрям матеріального розрахунку: від кількості оксиду заліза можна перейти до теоретичної потреби в розкиснювачі. Вони не доводять, що весь

оксид буде відновлено в реальній ванні: результат залежить від термодинамічних і кінетичних умов.

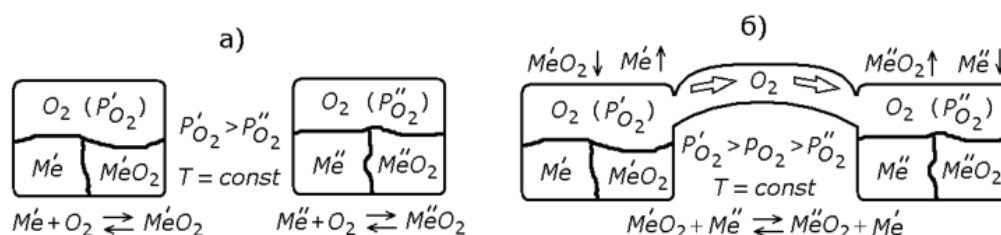


Рис. 21.1. Умовна схема взаємодії металу, його оксиду й розкиснювача

Джерела розділу: [1, розд. 5, с. 299–313].

3. Стехіометрія реакцій розкиснення

3.1. Мольні співвідношення

Хімічне рівняння дає співвідношення кількостей речовин. За реакцією кремнію один моль Si взаємодіє з двома молями FeO і утворює один моль SiO₂. За реакцією марганцю співвідношення Mn і FeO становить один до одного. Тому для однакової кількості FeO масова потреба в цих двох розкиснювачах різна.

$$n(\text{Si}) = n(\text{FeO}) / 2 \quad (21.4)$$

$$m(\text{Si}) = n(\text{Si}) \cdot M(\text{Si}) \quad (21.5)$$

Якщо заданий феросиліцій, після обчислення теоретичної маси чистого кремнію визначають масу сплаву за його складом. Наприклад, у навчальній задачі масова частка Si задається вихідними даними. Не слід вважати всі феросплави однаковими або переносити умовну частку засвоєння на реальні марки матеріалів.

$$m(\text{феросиліцію}) = m(\text{Si}) / w(\text{Si}) \quad (21.6)$$

3.2. Перевірка результату

Перед розрахунком необхідно перевірити правильність рівняння та одиниць маси. Після розрахунку порівнюють сумарну масу вихідних і кінцевих речовин у межах прийнятої схеми. Якщо в реальному процесі частина оксидів не перейшла до шлаку, її не можна приховувати в балансі — для цього необхідні додаткові експериментальні дані.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3]; [2, тема 7]. [3, розд. про оксиди металів]

4. Перехід продуктів розкиснення у шлак

4.1. Шлакова фаза як приймач оксидів

Зварювальний шлак містить розплавлені оксиди й інші сполуки, утворені з флюсу, покриття електрода та продуктів реакцій у ванні. Шлакова фаза ізолює рідкий метал від повітря та бере участь у хімічній обробці поверхні розплаву. Однак утворення SiO₂ або MnO ще не означає, що ці оксиди повністю видалені з металу: краплини можуть залишитися в ньому як неметалеві включення.

Перехід частинок до шлаку визначається їх змочуванням, розмірами, густиною, міжфазною взаємодією та перемішуванням ванни. На рівні нашого курсу важливо встановити причинний зв'язок: склад розкиснювача впливає на природу оксидного продукту, а властивості шлаку — на можливість його видалення.

Таблиця 21.1. Спрощений маршрут продуктів реакцій

Вихідна речовина	Хімічний продукт	Бажаний подальший процес
FeO + Si	SiO ₂	Перехід у шлакову фазу
FeO + Mn	MnO	Перехід у шлак або оксидну фазу
Оксидні плівки	Частинки оксидів	Розплавлення, зв'язування або видалення

4.2. Межі навчальної моделі

У задачі можна припустити стовідсотковий перехід продуктів у шлак і розрахувати їх масу. Для прогнозу якості конкретного шва це припущення потрібно замінити перевіреними даними про матеріали, умови процесу та фактичну кількість включень.

Джерела розділу: [1, розд. 6–7, 10].

5. Легування: три джерела надходження елементів

5.1. Металева, шлакова й газова фази

Легуванням називають цілеспрямоване введення елементів для отримання потрібного складу й властивостей металу шва. Елементи можуть надходити з основного металу, присадного дроту або стрижня електрода; за окремих умов — із металевих добавок флюсу, покриття чи шлакової фази. У посібнику Коперсака ці шляхи розглянуті окремо, оскільки механізми їх реалізації різні.

Найпростіший для студента випадок — змішування двох металевих складових без реакційних втрат. Складніший випадок виникає, коли частина елемента переходить до оксиду або залишається в шлаку. Тоді потрібно відокремлювати масу, що надійшла до зони плавлення, від тієї, що фактично засвоєна металом шва.

$$m(E) = \Sigma m_i(E) - m_{\text{втр}}(E) \quad (21.7)$$

У реальному процесі втрати можуть складатися з кількох потоків. Якщо таких даних немає, коректно задавати умовний коефіцієнт переходу в навчальній задачі та прямо зазначати, що це параметр умови, а не універсальна характеристика зварювання.

Джерела розділу: [1, розд. 8.1, с. 404–417]. [4, розд. про матеріальний баланс]

6. Спрощений матеріальний баланс складу шва

6.1. Склад за масовими частками

Якщо відомі маси основного і присадного металів та вміст певного елемента в кожному з них, спочатку знаходять масу елемента в кожній складовій. Далі їх підсумовують, ураховують задану масу засвоєних добавок і, за необхідності, віднімають визначені в умові

втрати. Утворений результат відносять до заданої маси кінцевого металу шва. Позначимо маси двох металів m_1 і m_2 , а відповідні масові частки елемента — w_1 і w_2 .

$$m(E) = m_1 \cdot w_1 + m_2 \cdot w_2 \quad (21.8)$$

$$w(\text{шов}, E) = m(E) / m(\text{шва}) \quad (21.9)$$

Для сплавів з кількома важливими елементами розрахунок повторюють окремо для С, Мп, Si, Cr або інших компонентів, склад яких заданий. Зручно складати коротку таблицю надходження: джерело, маса матеріалу, частка елемента, маса елемента. Це зменшує ризик переплутати масу матеріалу з масою самого легувального елемента.

Таблиця 21.2. Облік надходження одного елемента

Джерело	Маса матеріалу	Частка E	Маса E
Основний метал	m_1	w_1	$m_1 \cdot w_1$
Присадний метал	m_2	w_2	$m_2 \cdot w_2$
Металева добавка	m_3	w_3	$m_3 \cdot w_3$

Такий баланс корисний для пояснення принципу формування складу, але сам по собі не враховує локальну неоднорідність, випаровування чи розподіл елементів між фазами.

Джерела розділу: [1, розд. 8.1].

7. Рафінування від шкідливих домішок

7.1. Сірка у сталевому металі шва

Рафінування спрямоване на зменшення вмісту домішок, які погіршують властивості готового металу. Для сталевих швів особливе значення мають сірка та фосфор. Сірка може утворювати з залізом легкоплавкі сполуки й несприятливі складові між кристалами, що підвищує ризик гарячих тріщин під час затвердіння.

Марганець може зв'язувати сірку в сульфід MnS ; основні шлаки з CaO також можуть сприяти її переходу з металу до шлаку. Розглянемо схематично дві наведені в підручнику реакції. Квадратні дужки позначають металеву фазу, круглі — шлакову.



7.2. Фосфор

Підвищений уміст фосфору також може погіршувати властивості сталі. Його видалення потребує відповідного окиснювального і шлакового середовища; не можна вважати, що будь-який зварювальний флюс однаково ефективно видалить цю домішку. Тому на рівні ФМБ достатньо розуміти роль вихідної чистоти матеріалів, функції шлаку та обмеження простих хімічних схем.

Джерела розділу: [1, розд. 8.2, с. 417–427].

8. Зведення процесів і висновки

8.1. Послідовність хімічного аналізу

Спочатку встановлюють джерела надходження металу, кисню та домішок. Далі записують можливі реакції окиснення і розкиснення, визначають склад продуктів і можливі шляхи їхнього переходу до шлаку. Після цього складають матеріальний баланс легувальних елементів, окремо враховуючи втрати, якщо такі дані надані. Завершальним етапом є оцінювання можливого впливу залишкових оксидів і домішок на якість шва.

Хімічні процеси не ізольовані один від одного: компонент, який вводять як легувальний, може брати участь у розкисненні; вміст оксидів у металі впливає на можливості видалення сірки; шлак водночас захищає та взаємодіє з ванною. Для майбутнього фахового молодшого бакалавра головне — бачити цю взаємодію та коректно застосовувати прості стехіометричні й балансові розрахунки.

Питання для самоперевірки

1. Які три фази взаємодіють у зварювальній реакційній зоні?
2. Чому Mn і Si використовують для розкиснення?
3. Куди мають перейти продукти розкиснення?
4. У чому різниця між надходженням і засвоєнням легувального елемента?
5. Які домішки важливі під час рафінування сталі?
6. Чому простий матеріальний баланс не є точним прогнозом властивостей шва?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1, 5, 7–8, 10.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 7–8.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про оксиди та хімічні властивості металів.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: окисно-відновні реакції.

ХІМІЧНІ ПРИЧИНИ УТВОРЕННЯ ПОР, НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТА ІНШИХ ДЕФЕКТІВ ЗВАРНОГО МЕТАЛУ

1. Дефекти зварного металу та їхня хімічна природа

Якість зварного шва залежить не лише від формування його геометричної форми. Під час плавлення і кристалізації відбуваються реакції між металом, газами та шлаком. Якщо газ не встигає вийти з розплаву, утворюються пори; якщо неметалеві продукти залишаються всередині, виникають включення. Особливості складу й розподілу домішок можуть сприяти утворенню тріщин.

Пора — порожнина, пов'язана з газом у затверділому металі. Неметалеve включення — частинка шлаку, оксиду або іншої неметалевої сполуки, що залишилася в металевій матриці. Тріщина — порушення суцільності металу; її виникнення, окрім хімічних причин, залежить від температури, структури та напружень. Тому не слід пояснювати кожну тріщину одним лише хімічним чинником.

Завдання теми — простежити шлях від початкового стану зварювальних матеріалів до можливого дефекту. Для кількісних прикладів розглядаються тільки визначення мас реагентів і продуктів за рівняннями та прості матеріальні баланси, без розрахунків механіки руйнування чи складної кінетики кристалізації.

Джерела розділу: [1, розд. 4–5, 10–11].

2. Утворення газових пор: вуглець і кисень

2.1. Чому може виділятися CO

У сталі кисень може взаємодіяти з вуглецем із виділенням оксиду Карбону(II) CO. За певних умов газ формується безпосередньо у зварювальній ванні. Якщо бульбашки встигають спливати на поверхню, вони не залишають пор. Якщо рідкий метал кристалізується раніше, газові порожнини фіксуються в твердому шві.



Для навчальних розрахунків можна використати модель реакції FeO з Карбоном. За кількістю речовини FeO знаходять теоретичну кількість CO, не плутаючи її з фактичним об'ємом пор: далеко не весь теоретично можливий газ залишається всередині металу.



2.2. Значення швидкості кристалізації

Виведення газу — процес, що відбувається протягом обмеженого часу існування рідкої ванни. Кристалізаційний фронт може захоплювати бульбашки або сприяти їх зародженню в місцях контакту різних фаз. Тому пористість — результат поєднання хімічного утворення газу й умов його видалення.

Джерела розділу: [1, розд. 5.3.2, 10.1]. [2, розд. про неметали]

3. Водень та азот як джерела газових дефектів

3.1. Розчинення газів у рідкому металі

Під час нагрівання рідкий метал здатний розчиняти гази; при охолодженні розчинність деяких із них різко змінюється. У посібнику Коперсака розглянуто залежності розчинності водню й азоту від температури в залізі. Це допомагає пояснити, чому в окремі моменти кристалізації раніше розчинений газ виділяється у вигляді бульбашок.

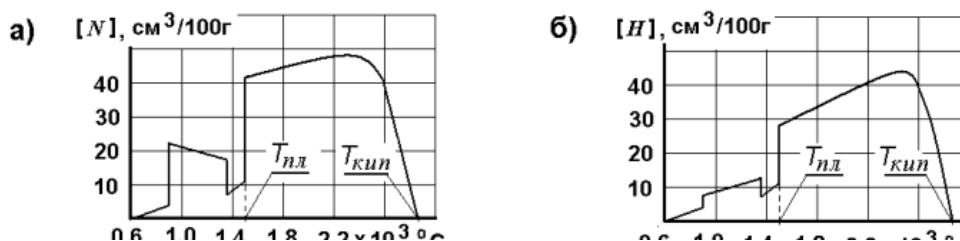


Рис. 22.1. Залежність розчинності азоту й водню в залізі від температури

Джерелом водню можуть бути волога на кромках, у зварювальних матеріалах, покриттях і флюсах. Повністю усунути його вплив одним лише збільшенням витрати захисного газу не можна: потрібно контролювати стан і зберігання матеріалів та сухість поверхонь.

3.2. Не всі гази діють однаково

Азот із повітря потрапляє до незахищеної зварювальної зони, а водень додатково пов'язаний із вологою та водневмісними домішками. Окрім пористості, розчинений водень може сприяти утворенню холодних тріщин у сприйнятливих сталях. Аргон як захисний газ не слід автоматично відносити до хімічних джерел водню або азоту.

Джерела розділу: [1, розд. 4.2–4.3, 10.1, 11.3]. [3, розд. про водень]

4. Як виникає бульбашка на фронті кристалізації

4.1. Місце зародження

Газовій бульбашці легше виникнути на вже існуючій межі розділу фаз, ніж усередині однорідного розплаву. Такою межею може бути фронт кристалізації, поверхня твердого включення або оксидна плівка. Під час росту кристалів окремі газові порожнини відтинаються від рідкої ванни.

Форма й розташування пор можуть відрізнятися. Деякі порожнини мають майже округлий вигляд, інші витягнуті в напрямі кристалізації. Лише за зовнішньою формою не завжди можна надійно встановити, який саме газ був причиною: для цього потрібні додаткові відомості про матеріал і процес.

4.2. Попереджувальні заходи

Хімічна профілактика включає видалення іржі, вологи й забруднень, які можуть постачати кисень або водень, застосування передбачених матеріалів і ефективний газовий або шлаковий захист. Необхідність конкретних технологічних параметрів визначають за

відповідною документацією; у курсі хімії розглядаємо тільки причини та наслідки цих рішень.

Таблиця 22.1. Зв'язок забруднення й ризику

Джерело	Можливе надходження	Можливий наслідок
Волога на кромках	Водень	Пористість або водневі проблеми
Оксидні плівки	Кисень, оксиди	СО та неметалеві включення
Недостатній захист від повітря	Кисень, азот	Окиснення, газопоглинання

Джерела розділу: [1, розд. 4, 10.1].

5. Оксидні й шлакові включення

5.1. Хімічні джерела неметалевих частинок

Продуктами розкиснення кремнієм і марганцем є SiO_2 та MnO . До них можуть приєднуватися оксиди алюмінію й інші сполуки з покриття, флюсу або окисненої поверхні основного металу. Бажано, щоб неметалеві продукти перейшли до шлаку, але певна частина включень може залишатися в шві.



Великі шлакові включення можуть виникати через захоплення фрагментів шлаку; дрібні оксидні частинки — безпосередньо після хімічних реакцій. Для встановлення походження потрібні дані про склад включення та умови утворення. Просте «збільшення розкиснювача» без аналізу системи не гарантує чистоту металу, оскільки утворює додаткові оксидні продукти.

5.2. Умовний масовий баланс

За заданою масою окисненого кремнію можна обчислити теоретичну масу SiO_2 . Але для визначення фактичної кількості включень у шві необхідно знати, яка частка цього продукту залишилася в металі. У навчальному завданні таку частку обов'язково задають.

Джерела розділу: [1, розд. 5, 7, 10.2].

6. Перехід включень крізь межу метал — шлак

6.1. Чому одні частинки видаляються, а інші залишаються

Після утворення оксидна частинка повинна досягти поверхні розділу металу й шлаку та перейти в шлакову фазу. Це залежить від густини й розміру частинки, руху рідини, поверхневого й міжфазного натягу. Однакові за масою частинки різного складу можуть поводитися по-різному. Тому очищення металу шва — не лише стехіометрична, а й міжфазна задача.



Рис. 22.2. Можливе розташування неметалевих включень на межі металу і шлаку

У навчальних розрахунках ми не визначаємо швидкості спливання за складними фізичними моделями. Натомість встановлюємо хімічний склад продукту та зазначаємо, чи за умовою він перейшов до шлаку. Якщо відомі початкова та залишкова маси включень, частку видалення можна обчислити через простий баланс.

$$\eta(\text{видалення}) = (m_0 - m_{\text{зал}}) / m_0 \cdot 100 \% \quad (22.5)$$

Значення, отримане за цією формулою, характеризує лише задану навчальну ситуацію; воно не замінює лабораторного контролю конкретного зварного з'єднання.

Джерела розділу: [1, розд. 7.3–7.4, 10.2].

7. Тріщини й небажаний склад металу

7.1. Сірка й фосфор

Сірка може утворювати в сталях легкоплавкі складові на межах кристалів. Під час кристалізації й дії усадкових напружень це підвищує ризик гарячих тріщин. Важливу роль відіграють також фосфор та особливості його розподілу між металом і неметалевою фазою. Вміст домішок визначають за маркою і документами на матеріали, а не за зовнішнім виглядом зварного шва.

7.2. Водень і холодні тріщини

Холодні тріщини пов'язують із сукупною дією сприйнятливої мікроструктури, напружень та дифузійного водню. Тому навіть правильне хімічне очищення кромки не завжди достатнє для запобігання дефекту. Проте обмеження вологості й правильне поводження з матеріалами є важливою хімічною передумовою.

Таблиця 22.2. Хімічні чинники дефектів

Чинник	Можливий результат	Хімічна профілактика
Надлишок кисню й реакція з С	Пори CO	Контроль окиснення і розкиснення

Чинник	Можливий результат	Хімічна профілактика
Волога та водень	Пори або холодні тріщини	Чисті й сухі матеріали
Сірка й легкоплавкі сполуки	Схильність до гарячих тріщин	Контроль домішок, рафінування

Жоден рядок таблиці не означає, що дефект обов'язково виникне: потрібні ще умови його зародження та зростання.

Джерела розділу: [1, розд. 8.2, 10–11].

8. Практична логіка пошуку хімічних причин

Якщо виявлено пори, насамперед перевіряють можливі джерела газу: стан поверхні, вологість і склад зварювальних матеріалів, захисне середовище, реакцію вуглецю з киснем. При включеннях увагу звертають на оксидні плівки, продукти розкиснення, склад і поведінку шлаку. У випадку тріщин хімічні чинники — вміст сірки, фосфору або водню — потрібно аналізувати разом зі структурою та напруженнями.

Для фахового молодшого бакалавра достатньо вміти скласти відповідне рівняння реакції, визначити можливий газ чи оксид, виконати простий теоретичний баланс і пояснити, яка додаткова інформація потрібна для висновку про реальну причину дефекту. Не можна визначати допустимість пор, включень і тріщин без застосовної документації та результатів контролю.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються пора і неметалева включення?
2. Як CO може утворитися у сталевій ванні?
3. Чому зниження розчинності газу під час охолодження сприяє пористості?
4. Які оксиди виникають після розкиснення Si та Mn?
5. Чому включення може залишитися на межі металу й шлаку?
6. Які хімічні чинники пов'язані з гарячими і холодними тріщинами?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–5, 7–8, 10–11.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Оксиген, Нітроген і неметалічні сполуки.

[3] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про водень, оксиди та газу.

[4] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми з основ хімічних перетворень.

КОРОЗІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ І ХІМІЧНА НЕОДНОРІДНІСТЬ МЕТАЛУ**1. Корозія зварних з'єднань як хімічна та електрохімічна проблема**

Корозією називають самовільне руйнування металу або сплаву внаслідок хімічної чи електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. У зварній конструкції поряд містяться основний метал, метал шва й зона термічного впливу. Їхній склад, структура та стан поверхні можуть відрізнятися, а отже, вони можуть по-різному взаємодіяти з вологою, киснем і розчинами солей.

Навіть коли метал шва та основна деталь є сталлями, хімічна неоднорідність, включення, залишки оксидів і стан захисного покриття створюють умови для нерівномірної корозії. Розрізняють рівномірне зменшення товщини металу, локальні ураження та руйнування, яке за певних умов пов'язане з механічними напруженнями. Назву механізму встановлюють за середовищем і характером електродних реакцій, а не лише за кольором продуктів корозії.

У цій лекції зосередимося на хімічних процесах і простих кількісних характеристиках корозії. Підбір зварювальних режимів і розрахунок міцності конструкції належать до інших професійних дисциплін.

Джерела розділу: [1, розд. 2, 4, 6–7].

2. Електрохімічні ділянки на неоднорідній поверхні**2.1. Анод і катод в одному з'єднанні**

Коли ділянки металу мають різні електродні потенціали та контактують між собою через електропровідне середовище, можуть виникати локальні корозійні елементи. На анодній ділянці метал окиснюється та переходить у розчин у вигляді йонів; на катодній відбувається реакція відновлення. Обидва процеси пов'язані перенесенням електронів через метал і йонів через середовище.



У нейтральному аерованому середовищі типовим катодним процесом може бути відновлення кисню. В кислому середовищі за певних умов можливе виділення водню. Реальні швидкості залежать від концентрації реагентів, рН, температури та стану металевої поверхні.



Різнорідні ділянки зварного з'єднання не обов'язково формують небезпечну гальванічну пару: напрям і швидкість корозії визначаються потенціалами саме в конкретному середовищі, співвідношенням площ і наявністю електроліту.

Джерела розділу: [1, розд. 4–6]; [2, тема 8]. [4, розд. про електрохімію]

3. Хімічна неоднорідність основного металу та шва

3.1. Чому склад ділянок не є однаковим

Метал шва формується змішуванням розплавленого основного та присадного металів; на його склад впливають окиснення, розкиснення, легування й рафінування. Зона термічного впливу не обов'язково має інший середній склад, але її структура змінюється внаслідок нагрівання та охолодження. Ці чинники важливо не плутати: хімічна й структурна неоднорідність можуть поєднуватися, але не є тотожними.

Під час експлуатації локальні відмінності вмісту легувальних елементів, оксидні плівки, включення та неоднорідність захисного покриття можуть змінювати швидкість корозійних реакцій. Наприклад, у корозійностійких сталях локальне збіднення поверхні певним легувальним компонентом за відповідних умов погіршує здатність до пасивації.

Таблиця 23.1. Джерела неоднорідності зварного з'єднання

Ділянка	Можлива відмінність	Що перевіряють
Основний метал	Початковий склад і стан поверхні	Марку, покриття, наявність оксидів
Метал шва	Змішування та втрати елементів	Склад присадки і фактичний шов
Зона термічного впливу	Зміни структури й напружень	Умови роботи та корозійні прояви

Із самої наявності шва не впливає, що саме він буде анодом: це перевіряють з урахуванням сплаву та середовища.

Джерела розділу: [1, розд. 6, 7, 10]; [3, розд. 8–9].

4. Середовище: кисень, волога, солі та рН

4.1. Киснева деполяризація і локальні умови

У вологому повітрі та водних середовищах на поверхні зварних конструкцій може утворюватися електролітна плівка. В ній розчиняється кисень, а електрохімічні реакції протікають на різних ділянках металу. Наявність шлакових залишків, щілин або забруднень може сприяти затриманню вологи та створювати локальні відмінності в надходженні кисню.

4.2. Вплив кислотності і розчинених солей

Значення рН змінює перебіг анодних і катодних реакцій, а деякі аніони можуть порушувати пасивні плівки. Для інженерної оцінки недостатньо знати, що середовище «вологе»: потрібно з'ясувати, чи присутні солі, як довго поверхня перебуває вологою і чи змінюється кислотність. Особливо важливо перевіряти ділянки біля швів, де можуть накопичуватися залишки технологічних речовин.

Таблиця 23.2. Чинники середовища

Чинник	Вплив, який слід аналізувати
--------	------------------------------

Чинник	Вплив, який слід аналізувати
Волога	Утворення провідної плівки на поверхні
Кисень	Можлива участь у катодній реакції
Хлориди	Можливе порушення пасивного стану
pH	Зміна характеру електродних процесів

Джерела розділу: [1, розд. 5–6, 8].

5. Місцева корозія й поверхневі дефекти

5.1. Щілини, пори покриття та включення

Місцева корозія концентрується на обмежених ділянках поверхні. Для зварної конструкції це можуть бути місця порушення покриття, щілини та поверхневі нерівності, у яких тривалий час затримується електроліт. Такі ураження небезпечні тим, що загальна втрата маси може бути невеликою, але глибина пошкодження в окремій точці — суттєвою.

Неметалеві включення й відмінності структури сплаву можуть створювати неоднорідні електрохімічні умови. Водночас для кожного матеріалу механізм необхідно перевіряти: не будь-яке включення автоматично є анодом або катодом. Хімічний склад і розташування включень також впливають на стан навколишньої металевої матриці.

5.2. Вплив чистоти обробки поверхні

Ретельне видалення оксидів, бризок і залишків шлаку важливе не лише перед нанесенням покриття. Чиста доступна поверхня полегшує виявлення перших осередків корозії та контроль суцільності покриття. Утім, після очищення активна металева поверхня не повинна довго залишатися без передбаченого захисту у вологому середовищі.

Джерела розділу: [1, розд. 6, 9, 11]. [5, розд. про сполуки металів]

6. Корозія за дії механічних напружень

6.1. Чому навантаження мають значення

Зварні конструкції часто працюють під постійними або змінними навантаженнями. У відповідному корозійному середовищі механічні напруження можуть прискорювати розвиток пошкодження. Посібник із корозії окремо розглядає корозійне розтріскування, корозійну втому та водневу крихкість; це різні механізми, які не можна об'єднувати одним терміном.

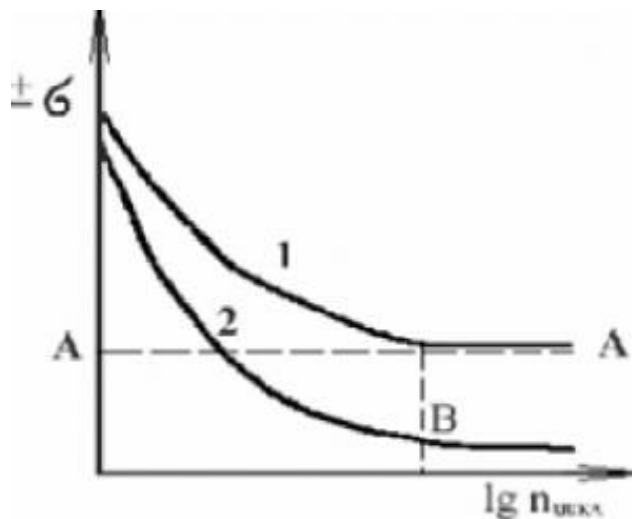


Рис. 23.1. Діаграма Велера: 1 — втома; 2 — корозійна втома

При корозійній втомі циклічні навантаження поєднуються з дією середовища, а для окремих корозійно-активних систем можливе розтріскування за наявності розтягувальних напружень. Воднева крихкість також залежить від сплаву, мікроструктури й умов надходження водню. Хімічна профілактика включає контроль агресивності середовища та якості захисту, але не замінює належного конструювання.

Для рівня ФМБ достатньо пояснити, чому покриття, контроль вологи та попередження пошкоджень поверхні впливають на ресурс з'єднання, не обчислюючи швидкість розвитку тріщини за складними моделями.

Джерела розділу: [1, розд. 7, с. 93–102].

7. Розрахунок швидкості корозії

7.1. Втрата маси на одиницю площі та часу

Для рівномірного корозійного ураження за результатами випробування можна визначити масовий показник швидкості корозії. Потрібні початкова й кінцева маси підготовленого зразка, площа відкритої поверхні та тривалість експозиції. Перед обчисленням необхідно уточнити, чи враховано масу продуктів корозії та чи однаковими є умови очищення зразків до й після випробування.

$$\Delta m = m_0 - m_1 \quad (23.3)$$

$$K_m = \Delta m / (S \cdot t) \quad (23.4)$$

Масовий показник можна перерахувати на інший час або площу лише за припущення, що процес за відповідний інтервал перебігав із приблизно сталою швидкістю. Для місцевої корозії така екстраполяція може приховати глибокі пошкодження окремих ділянок. Показник служить для порівняння зразків у контрольованих умовах, але не є самостійним прогнозом ресурсу зварної конструкції.

Таблиця 23.3. Дані для навчального розрахунку

Показник	Позначення	Одиниця
Втрачена маса	Δm	г
Відкрита площа	S	м ²
Тривалість	t	год
Масовий показник	K_m	г/(м ² ·год)

Джерела розділу: [1, розд. 2.3, 9].

8. Запобігання та контроль корозії з'єднань

Захист починається з аналізу сплавів, умов експлуатації й геометрії конструкції. Для зварного з'єднання важливо правильно очищати поверхню, видаляти залишки шлаку та речовини, що затримують вологу, забезпечувати доступність ділянок для огляду й застосовувати сумісне покриття. Якщо передбачено додатковий електрохімічний захист, його схему визначають відповідно до конкретної конструкції та середовища.

Результати контролю оцінюють за кількома ознаками: характером і глибиною пошкоджень, зміною маси або товщини, станом захисної плівки та умовами вологості. Поєднання металу шва й основного металу не завжди означає прискорене руйнування, але неоднорідність необхідно враховувати під час огляду й випробувань.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються хімічна й електрохімічна корозія?
2. Чому різні ділянки зварного з'єднання можуть поводитися неоднаково?
3. Які катодні реакції можливі у водному середовищі?
4. Чому місцева корозія не завжди помітна за втратою маси?
5. Як визначити масовий показник швидкості корозії?
6. Які роботи з підготовки поверхні зменшують ризик корозії?

Використані джерела

- [1] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Ліночев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 2, 4–11.
- [2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 8.
- [3] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 8–9.
- [4] Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. Розділи про електрохімічні процеси.
- [5] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про властивості металів і сполук Феруму.

ХІМІЧНА ПІДГОТОВКА ПОВЕРХОНЬ ПЕРЕД ЗВАРЮВАННЯМ: ОЧИЩЕННЯ, ЗНЕЖИРЕННЯ ТА ВИДАЛЕННЯ ОКСИДІВ

1. Навіщо очищати поверхні перед зварюванням

До зварювання металеві кромки можуть містити мастила, консерваційні матеріали, вологу, іржу, окалину й інші залишки. Вони змінюють контакт металу із захисним середовищем і можуть постачати в зварювальну ванну кисень, водень та неметалеві частинки. Тому підготовка поверхонь має не лише механічне, а й хімічне значення.

Очищення охоплює різні за природою дії: знежирення для видалення органічних забруднень, видалення твердих оксидних нашарувань, промивання після застосування відповідних хімічних засобів і висушування поверхні. Послідовність залежить від виду металу, наявного забруднення й вимог обраного технологічного процесу.

Матеріали цієї теми пояснюють хімію підготовки, а не задають рецептури робочих травильних ванн або інструкції для небезпечних кислот. Для конкретного виробництва склад і режим очищення беруть тільки з чинної технологічної документації та паспортів безпеки речовин.

Джерела розділу: [1, розд. 4.3, 10.1]; [2, розд. 6, 11].

2. Органічні забруднення й знежирення

2.1. Чому мастило заважає зварюванню

Мастила, оливи й консерваційні плівки утворюють бар'єр між металом і навколишнім середовищем. Під дією високої температури органічні сполуки можуть термічно розкладатися, виділяючи газоподібні продукти; за наявності водневмісних речовин зростає ризик надходження водню до реакційної зони. Тому зварювання без належного видалення забруднень може створювати додаткові передумови для пористості.

2.2. Хімічний принцип знежирення

При знежиренні забруднення переводять із поверхні у фазу, яку можна відокремити від виробу. Залежно від технології застосовують дозволені спеціальні засоби, водні мийні склади та інші матеріали відповідно до їхнього призначення. Розчинення жирів забруднень, емульгування та змочування є різними фізико-хімічними механізмами, тому одне й те саме очищення не однаково придатне для всіх типів забруднення.

Для навчального розрахунку достатньо знати масу концентрату й масову частку його активної речовини. Наявність мийного засобу сама по собі не гарантує чистоту поверхні: після очищення потрібні контроль і, за технологічною вимогою, промивання.

Джерела розділу: [1, розд. 10.1]; [2, розд. 11.3].

3. Оксиди на поверхні сталевих деталей

3.1. Іржа й окалина

На поверхні залізовуглецевих сплавів за контакту з киснем і вологою утворюються оксиди та інші продукти корозії. Під час нагрівання можливе утворення окалини з різними оксидними фазами. Такі плівки заважають передбачуваному контакту розплаву з чистим основним металом і можуть переходити в реакційну зону або шлак.

З навчальною метою розглянемо спрощену хімічну реакцію між оксидом заліза(III) та хлоридною кислотою. Вона пояснює, чому оксидна речовина за відповідних умов може переходити в розчин у формі солі; реальна іржа має складніший склад, а травильний процес визначається властивостями конкретної поверхні.



3.2. Що важливо для балансу

Якщо в умові подано теоретичну масу чистого Fe_2O_3 , за рівнянням можна обчислити кількість необхідної кислоти. Для реальної окалини, яка містить різні фази та домішки, такої інформації вже недостатньо. Тому студент повинен розрізняти теоретичну реакцію з чистою сполукою й технологічний процес очищення неоднорідної поверхні.

Джерела розділу: [2, розд. 2–3, 11]; [3, тема 4]. [4, розд. про оксиди]

4. Хімічне видалення оксидів та його обмеження

4.1. Взаємодія кислот із металами

Кислотний засіб може взаємодіяти не тільки з оксидами, а й із самим металом. Для заліза в неокиснювальній кислоті за відповідних умов можливе виділення водню. Ця реакція пояснює, чому неконтрольоване використання кислоти загрожує не лише втратою металу, а й небажаним газоутворенням та додатковими небезпеками.



Поверхні алюмінієвих, титанових і деяких інших сплавів мають специфічні оксидні плівки. Тому спосіб, який застосовують до однієї сталі, не можна автоматично переносити на всі інші матеріали. Для хімічної підготовки виробів використовують лише призначені для цього склади з установленими умовами застосування.

4.2. Механічні та хімічні методи не взаємовиключні

За наявності товстої окалини або важких забруднень може бути потрібне попереднє механічне очищення. Хімічний етап тоді впливає на залишкові поверхневі сполуки. Після нього необхідні операції, що усувають залишки реагентів відповідно до технології. Вибір методу пов'язаний з природою металу, станом кромek і подальшою операцією зварювання.

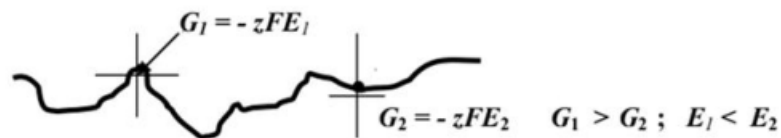


Рис. 24.1. Умовне пояснення впливу шорсткості на неоднорідність поверхні металу

Джерела розділу: [2, розд. 6, 11]; [3, тема 8].

5. Промивання, нейтралізація й контроль залишків

5.1. Чому не можна залишати кислотний розчин

Після хімічного очищення залишки реагенту можуть надалі взаємодіяти з основним металом і спричинювати корозійні пошкодження. Залежно від технологічної схеми передбачають видалення розчину з поверхні, належне промивання та контроль залишкової кислотності. Використання невідповідної води або неякісне висушування може створювати нові забруднення.

5.2. Реакція нейтралізації як навчальний приклад

Для пояснення кислотно-основної взаємодії використаємо умовну реакцію HCl із NaOH. За концентрацією та об'ємом залишкового розчину в навчальній задачі можна знайти теоретичну потребу в лузі. У реальному технологічному процесі склад залишків на поверхні зазвичай складніший, і такий розрахунок не замінює перевірки рН.



$$n(\text{HCl}) = c(\text{HCl}) \cdot V(\text{HCl}) \quad (24.4)$$

$$n(\text{NaOH}) = n(\text{HCl}) \quad (24.5)$$

Під час роботи з хімічними речовинами важливі сумісність засобів, вентиляція, захист працівника та безпечне поводження з відпрацьованими розчинами. У цьому конспекті навмисно не наводимо виробничих дозувань і процедур, які потребують окремої інструкції.

Джерела розділу: [3, теми 4–6]; [2, розд. 11]. [5, розд. про реакції кислот і основ]

6. Сухість поверхні та запобігання поглинанню водню

6.1. Волога як джерело небажаних компонентів

Після очищення кромки повинні мати стан, передбачений технологією зварювання. Волога на металі та в покриттях і флюсах може постачати водень до високотемпературної зони. Водень розчиняється в гарячому металі та за несприятливого поєднання складу сплаву, структури й напружень може бути пов'язаний із порами або холодними тріщинами.

Особливої уваги потребують місця, де затримується вода: щілини, заглиблення, нерівності й приховані поверхні. Промивання без подальшого належного висушування не завершує хімічну підготовку. Також після підготовки не слід повторно забруднювати кромки мастилом або дотиком брудного інструмента.

6.2. Що перевіряють перед зварюванням

Таблиця 24.1. Контроль стану кромки

Ознака	Можливий хімічний наслідок	Контрольна дія
Залишки оливи	Небажані продукти термічного розкладу	Перевірка знежирення
Іржа, окалина	Надходження оксидів	Контроль видалення нашарувань
Волога	Надходження водню	Контроль сухості
Залишки реагентів	Корозійна активність	Контроль очищення і промивання

Джерела розділу: [1, розд. 4.3, 10–11].

7. Схема хімічної підготовки металу

7.1. Логіка послідовності

Оскільки тип і ступінь забруднення відрізняються, універсальної для всіх металів процедури немає. Проте навчальна логіка складається з кількох послідовних рішень: спочатку встановлюють матеріал і забруднення, визначають придатний спосіб їх видалення, після хімічного етапу усувають залишки реагентів, а перед зварюванням перевіряють чистоту й сухість.

Таблиця 24.2. Етапи підготовки

Етап	Що встановлюють	Що перевіряють після нього
Огляд	Метал, тип забруднення	Обрано сумісний спосіб
Знежирення	Органічні залишки	Відсутність мастильних плівок
Видалення оксидів	Тип нашарувань	Стан металевої кромки
Завершальна обробка	Реагенти й волога	Чиста суха поверхня

У навчальному прикладі ця таблиця є схемою мислення, а не обов'язковою виробничою технологічною картою. Конкретні режими, реагенти та критерії контролю встановлюються окремою документацією для відповідних сплавів і процесів.

7.2. Чому важлива швидка наступна операція

Свіжоочищена поверхня може знову окиснюватися або забруднюватися, тому інтервал між підготовкою та зварюванням має відповідати технологічним вимогам. Не слід вважати

тривале зберігання очищених незахищених кромок еквівалентним негайному виконанню зварювання.

Джерела розділу: [1, розд. 10.1]; [2, розд. 6, 11].

8. Розрахунковий підсумок і запитання

Кількісна частина цієї теми базується на відомих із загальної хімії величинах: масовій частці компонента, кількості речовини, молярній концентрації та стехіометрії. За заданою кількістю умовно чистого оксиду можна розрахувати теоретичну потребу в кислоті. За потрібною масою робочого розчину та складом концентрату — визначити маси концентрату й розчинника, не встановлюючи при цьому справжню технологічну рецептуру. Тут m_a — маса активної речовини, m_p — маса робочого розчину, w_p — її частка в ньому; m_k і w_k — маса концентрату та частка активної речовини у концентраті.

$$m_a = m_p \cdot w_p \quad (24.6)$$

$$m_k = m_a / w_k \quad (24.7)$$

Перед виконанням будь-якого практичного розрахунку необхідно визначити, чи вихідні дані стосуються чистого реагенту, його водного розчину або реальної суміші. Без цього легко переплутати теоретичну хімічну потребу й фактичну масу технологічного продукту.

Питання для самоперевірки

1. Які забруднення найчастіше видаляють із кромок?
2. Чому мастила та волога можуть впливати на якість шва?
3. Що показує реакція оксиду заліза з кислотою?
4. Чому спосіб очищення сталі не можна без перевірки застосувати до всіх сплавів?
5. Навіщо контролювати залишки реагентів та сухість поверхні?
6. Які дані потрібні для розрахунку маси концентрату?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4, 10–11.

[2] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 6, 11.

[3] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 4, 6, 8.

[4] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про оксиди металів.

[5] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: реакції кислот і основ.

ПРОТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ І ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

1. Мета протикорозійного захисту зварних конструкцій

Зварні конструкції працюють у повітрі, воді або інших середовищах, де метали можуть зазнавати хімічної й електрохімічної корозії. Захисне покриття змінює контакт металевої поверхні з навколишнім середовищем, а деякі металеві покриття можуть додатково забезпечувати електрохімічний захист. Обраний спосіб повинен відповідати матеріалу конструкції, характеру середовища та передбаченим умовам експлуатації.

Захист включає не тільки нанесення шару речовини. Важливими етапами є попереднє очищення поверхні, вибір сумісних матеріалів, контроль цілісності та подальші огляди. Для зварних конструкцій особливо ретельно перевіряють зону шва, місця видалення шлаку, кути, кромки та ділянки, важкодоступні для очищення і нанесення покриття.

У цьому конспекті розглядаємо хімічну природу бар'єрних, металевих та інших захисних покриттів і навчальні розрахунки їхньої витрати. Він не містить універсальної схеми фарбування, оскільки конкретна система залежить від документації на матеріал і умов роботи виробу.

Джерела розділу: [1, розд. 10–12].

2. Металеві покриття: анодний і катодний механізми

2.1. Покриття з менш благородного металу

Якщо відносно сталі метал покриття за умов експлуатації є більш активним, пошкодження такого шару може призводити до переважного анодного розчинення матеріалу покриття. Типовий навчальний приклад — цинкове покриття на сталі. За наявності електроліту цинк може бути анодом, а залізо — катодом.



2.2. Покриття з більш благородного металу

Металеві шари з більш позитивним електродним потенціалом, наприклад олово на сталі у відповідному середовищі, насамперед ізолюють основу від електроліту. При пошкодженні такого катодного покриття відкритий основний метал може стати анодом локального елемента. Отже, для такого захисту особливо важливі суцільність і відсутність дефектів.

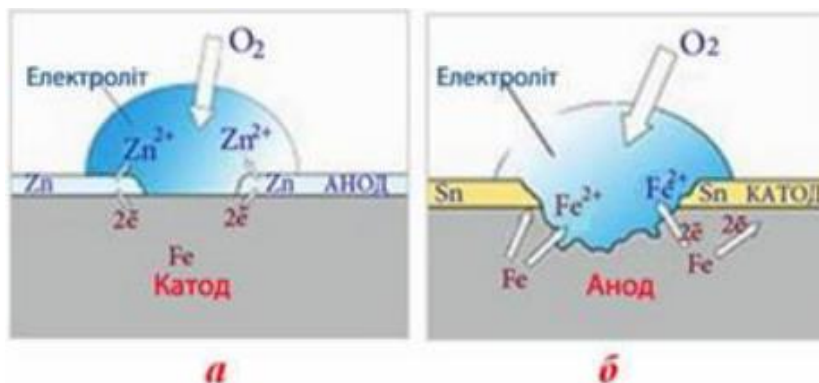


Рис. 25.1. Схеми корозії за пошкодження анодного й катодного металевих покриттів

Напрямок реакції встановлюють за поведінкою пари в конкретному середовищі, а не за довільним зіставленням матеріалів. Для зварних конструкцій також перевіряють сумісність покриття з основним і наплавленим металами.

Джерела розділу: [1, розд. 11.4, с. 148–151]. [3, розд. про електроліз]

3. Органічні й неорганічні бар'єрні покриття

3.1. Захисна роль полімерного шару

Лакофарбові матеріали утворюють на поверхні органічну плівку, яка обмежує доступ води, кисню та деяких агресивних речовин до металу. Властивості такої плівки залежать від її хімічного складу, товщини, пористості, адгезії та стійкості до конкретного середовища. За наявності дефектів електроліт може досягати поверхні металу і спричинювати локальну корозію під покриттям.

У деяких системах передбачають кілька шарів із різними функціями: ґрунтовий шар забезпечує зчеплення, наступні — необхідні бар'єрні та експлуатаційні властивості. Тип і кількість шарів визначають за документацією на обрану систему; універсальної для всіх зварних сталевих конструкцій рецептури не існує.

3.2. Неметалеві неорганічні покриття

За відповідних умов застосовують також емалі та інші неметалеві системи, які мають хімічну стійкість і низьку проникність. Вимоги до адгезії, температурної сумісності та відсутності тріщин для них особливо важливі. Для навчальної програми достатньо розуміти відмінність між механічним бар'єром і електрохімічним захистом.

Таблиця 25.1. Порівняння механізмів захисту

Тип	Основна дія	Критичний чинник
Органічний бар'єр	Обмеження контакту з електролітом	Суцільність і адгезія
Анодний металевий шар	Бар'єр і можливий протекторний ефект	Витрата матеріалу покриття

Тип	Основна дія	Критичний чинник
Катодний металевий шар	Переважно бар'єр	Відсутність пор і тріщин

Джерела розділу: [1, розд. 11.3–11.5].

4. Чому стан поверхні визначає довговічність захисту

4.1. Підготовка ділянки шва

На поверхні після зварювання можуть залишатися оксиди, шлакова кірка, бризки та інші забруднення. Вони заважають щільному контакту покриття з металом і сприяють утворенню прихованих дефектів. Тому підготовка швів, кромок і прилеглих ділянок є необхідним етапом створення захисної системи, а не декоративною операцією.

Неоднакова шорсткість, складна геометрія та наявність щілин також впливають на рівномірність нанесення й на можливість огляду покриття. За результатами підготовки перевіряють чистоту, стан поверхні та відповідність вимогам конкретного матеріалу. Вологу й залишки хімічних реагентів необхідно усунути до нанесення несумісного з ними покриття.

4.2. Контроль адгезії та суцільності

Посібник із корозії підкреслює значення підготовки поверхні, контролю нанесення й перевірки адгезії. Якісно нанесений, але погано зчеплений із забрудненою поверхнею шар може швидко втратити захисну функцію. Для об'єктивного контролю користуються передбаченими документацією методами вимірювання та випробування, а не лише візуальною оцінкою кольору покриття.

Джерела розділу: [1, розд. 6, 11.3–11.5]. [4, розд. про пасивацію металів]

5. Протикорозійний захист зварних вузлів у вологому середовищі

5.1. Можливі слабкі місця

Зварні вузли можуть мати ділянки зі складною геометрією, локальні пошкодження шару та неоднорідні умови змочування. У порожнинах і щілинах електроліт довше затримується, а доступ кисню може відрізнятись від відкритої поверхні. За цих умов навіть за незначної загальної втрати маси можуть виникати місцеві корозійні пошкодження.

Для конструкції важливо вибрати захисну систему, яка відповідає зовнішньому або внутрішньому середовищу, температурі та механічним впливам. Якщо покриття пошкоджене в зоні зварного шва, необхідно відновлювати захист за передбаченою технологією, не залишаючи відкриті ділянки до тривалої експлуатації.

5.2. Контроль після ремонту

Після місцевого ремонту шва можуть залишатися зони термічно пошкодженого або видаленого раніше покриття. Їх очищають і відновлюють відповідно до вимог системи. Контролю підлягають не тільки сам метал шва, а й прилеглі ділянки, де покриття могло втратити зчеплення або суцільність.

Джерела розділу: [1, розд. 6, 8, 11].

6. Розрахунок необхідної маси покривного матеріалу

6.1. Суха плівка та готовий матеріал

Для простого матеріального розрахунку задають площу поверхні, планову товщину висохлої плівки, густину сухого покриття й масову частку сухого залишку в матеріалі. Насамперед визначають об'єм висохлого шару за припущення рівномірної товщини; далі знаходять його масу та теоретичну масу матеріалу до висихання.

$$V_s = S \cdot \delta \quad (25.2)$$

$$m_s = V_s \cdot \rho \quad (25.3)$$

$$m_0 = m_s / w_s \quad (25.4)$$

Перед підстановкою важливо привести площу, товщину та густину до узгоджених одиниць. Якщо втрати під час нанесення становлять задану частку l , загальну потребу матеріалу визначають із урахуванням частини, що фактично залишається на конструкції.

$$m = m_0 / (1 - l) \quad (25.5)$$

Це навчальна модель, що не враховує локального перепаду товщини, складності геометрії та додаткових вимог виробника до багат шарової системи.

Джерела розділу: [1, розд. 11.5]; [2, тема 6].

7. Електрохімічний захист та інгібітори

7.1. Протекторний і катодний захист

Для окремих конструкцій використовують протекторний захист або катодний захист від зовнішнього джерела струму. Їхня дія базується на зміні електродних умов, за яких захищений метал менше розчиняється. Такі системи потребують урахування середовища, електричного контакту та контролю потенціалів; їх не можна проектувати лише за правилом «вибрати активніший метал».

7.2. Зміна властивостей середовища

Інший напрям захисту — зменшення агресивності самого корозійного середовища, наприклад застосування придатних інгібіторів у технологічних рідинах. Механізм їхньої дії пов'язаний із гальмуванням анодних або катодних процесів і зміною стану поверхні. У відкритих атмосферних конструкціях такий підхід не завжди можливий, тому вибір способу захисту залежить від доступності середовища для оброблення.

Металеві, органічні й електрохімічні способи можуть поєднуватися, проте їхня сумісність і ефективність визначають за конкретними матеріалами та нормативно-технічною документацією.

Джерела розділу: [1, розд. 11–12].

8. Висновки та контрольні запитання

Протикорозійний захист зварної конструкції починається зі встановлення умов експлуатації та аналізу поверхні. Далі вибирають принцип дії захисної системи: бар'єрне покриття, металевий шар із визначеною електрохімічною поведінкою або інші передбачені технологією методи. Якість підготовки швів і прилеглих ділянок, суцільність, товщина та адгезія покриття впливають на реальне виконання цієї функції.

У розрахункових задачах ФМБ студент може визначати площу захисту, об'єм і масу сухої плівки, теоретичну потребу в матеріалі та необхідний запас за заданими втратами. Але результат навчального балансу не можна вважати готовою виробничою нормою без даних про геометрію конструкції, властивості матеріалу та вимоги до системи нанесення.

Питання для самоперевірки

1. Які принципові відмінності бар'єрного й протекторного захисту?
2. Чому пори в катодному покритті можуть бути небезпечними?
3. Яку роль відіграє стан поверхні біля зварного шва?
4. Які параметри потрібні для розрахунку маси сухого покриття?
5. Для чого вводять коефіцієнт втрат під час нанесення?
6. Коли можливий електрохімічний захист і чому він потребує контролю?

Використані джерела

[1] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 6, 8, 10–12.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 6, 8.

[3] Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. Розділи про електрохімічне осадження металів.

[4] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про пасивацію та властивості металів.

ТЕМА 26

ЗВАРЮВАЛЬНІ АЕРОЗОЛІ ТА ГАЗОПОДІБНІ ПРОДУКТИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

1. Зварювальні аерозолі та гази як продукти високотемпературних процесів

Під час зварювання в реакційній зоні одночасно перебувають твердий і рідкий метал, шлак, гази дугового проміжку та продукти хімічних реакцій. Частина матеріалу може переходити до газової фази, а за охолодження — конденсуватися у вигляді дрібних частинок. Так виникає хімічний зв'язок між складом зварювального матеріалу, процесами у ванні та складом забруднень навколишнього повітря.

Аерозоль — дисперсна система, у якій тверді або рідкі частинки розподілені в газоподібному середовищі. Дим і пил є прикладами систем із твердою дисперсною фазою. Газові продукти, наприклад CO чи CO₂, слід розглядати окремо: вони можуть перебувати разом з аерозолем у повітрі, але не є твердими частинками диму.

Таблиця 26.1. Різниця між частинками та газоподібними продуктами

Форма	Що утворює дисперсну фазу	Приклад у виробництві
Твердий аерозоль	Дрібні тверді частинки в повітрі	Дим від конденсації та окиснення парів металу
Рідкий аерозоль	Дрібні краплі в повітрі	Туман під час операцій із рідинами
Газоподібний продукт	Газова суміш без окремої твердої фази	CO, CO ₂ , водяна пара

У цій лекції розглядаємо хімічні шляхи утворення аерозолів і газів, вплив складу зварювальних матеріалів та найпростіші матеріальні баланси. Конкретні граничні концентрації, вимоги до витяжок і правила застосування засобів захисту належать до чинних виробничих та санітарних документів і тут не замінюються навчальними формулами.

Джерела розділу: [1, розд. 1 і 3.3]; [2, підрозд. 6.8, с. 92].

2. З яких ділянок реакційної зони надходять частинки

2.1. Метал, шлак і газова фаза

Схема ручного дугового зварювання покритим електродом показує, що дуга контактує з електродною краплею та зварювальною ванною. На поверхні цих ділянок можливе випаровування речовин і перенесення продуктів реакцій у газову фазу. Покриття електрода та шлак не лише захищають метал: їхні компоненти також беруть участь у високотемпературних перетвореннях.

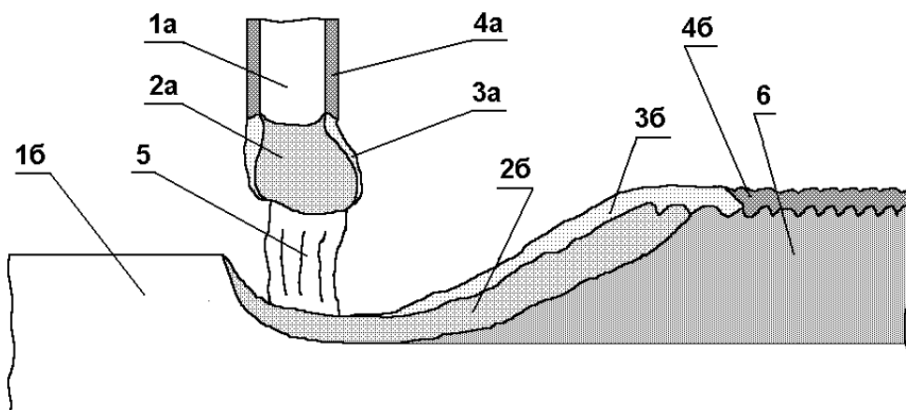


Рис. 26.1. Реакційна зона під час зварювання покритим електродом: твердий і рідкий метал, шлак та гази дуги

На схемі 1а і 1б — електродний та основний метали; 2а і 2б — крапля й ванна; 3а і 3б — рідкий шлак; 4а і 4б — покриття та шлакова кірка; 5 — електрична дуга; 6 — сформований шов. Для розуміння аерозолі особливо важлива межа між гарячим металом і газовим середовищем.

2.2. Випаровування й конденсація

Зі зростанням температури деякі компоненти розплаву легше переходять до пари. Після виходу з найгарячішої ділянки пара охолоджується; утворені частинки можуть взаємодіяти з киснем. Результат залежить від складу металу, температури й газового середовища, тому неможливо встановити один універсальний хімічний склад диму для всіх способів зварювання.

Джерела розділу: [1, розд. 1.2, 3.3 і 6.3].

3. Хімічний склад твердих продуктів

3.1. Залежність від основного та присадного металу

Під час зварювання сталі частинки можуть містити залізо та його оксиди. Якщо в металі або дроті є легувальні елементи, вони також можуть брати участь у випаровуванні й окисненні; конкретний склад залежить від технологічних умов. Наявність цинку на покритій поверхні змінює хімічний склад можливих продуктів нагрівання. Тому назва способу зварювання сама по собі не визначає повного складу аерозолі.

Приклад окиснення заліза ілюструє утворення оксидів із металу та атмосферного кисню. Рівняння показує лише можливий напрям реакції, а не гарантований склад реальних частинок диму.



3.2. Вплив покриттів, порошкового дроту та флюсів

Покриття електродів і порошковий дріт можуть містити оксиди, карбонати, органічні газоутворювачі та феросплави. Частина їх компонентів переходить у шлак, частина — у

газову фазу або інші продукти перетворення. Склад виділень змінюється разом із рецептурою матеріалу; оцінювати його тільки за маркою основного металу недостатньо.

Таблиця 26.2. Що впливає на можливий склад виділень

Джерело речовини	Хімічний чинник	Що потрібно з'ясувати
Основний метал	Склад сталі або сплаву	Які елементи нагріваються й окиснюються
Присадний дріт	Вміст легувальних елементів	Склад і кількість поданого дроту
Електродне покриття	Оксиди, карбонати, феросплави	Склад покриття і продуктів його розкладу
Флюс або шихта дроту	Шлако- і газоутворювальні компоненти	Які продукти залишають ванну

Джерела розділу: [1, розд. 3.3, 6–8]; [3, розд. 2 «Метали»].

4. Основні газоподібні продукти зварювальних процесів

4.1. Вуглекислий газ, оксид вуглецю та водяна пара

Газова фаза утворюється не лише із захисного газу. Під час нагрівання карбонатів і органічних компонентів покриттів виникають продукти розкладу. Карбонати можуть утворювати CO_2 ; за високих температур склад газової фази змінюється через рівноважні реакції. У процесах, пов'язаних із вуглецем та горючими газами, за нестачі кисню можливе утворення CO.



Оксид вуглецю(II) не можна визначати за видимістю диму: це окремий газоподібний продукт. Водяна пара може надходити з вологих матеріалів і продуктів горіння; у реакційній зоні вона пов'язана також із можливим надходженням водню до металу. Тому сухість передбачених зварювальних матеріалів має хімічне значення.

4.2. Продукти взаємодії азоту та кисню

У гарячій газовій зоні можливе утворення нітроген(II) оксиду з компонентів повітря; при подальшій взаємодії з киснем може утворюватися NO_2 . Це принципово інша група речовин, ніж тверді оксиди металів. Реальні кількості цих продуктів залежать від параметрів процесу й без вимірювання або належної методики не визначаються лише стехіометричним рівнянням.



Джерела розділу: [1, розд. 3.1, 4 і 6.3]; [3, розд. «Нітроген»]. [4, розд. про сполуки Нітрогену]

5. Чому виділення відрізняються за способами зварювання

5.1. Газовий і газозлаковий захист

Під час зварювання у захисному газі склад зовнішнього середовища задається сумішшю, але матеріал дроту й можливе підсмоктування повітря також впливають на склад реакційної зони. Під час ручного зварювання покритими електродами додатково діють продукти розкладу покриття та шлак. Під час зварювання під флюсом частина взаємодій відбувається під шаром сипучого матеріалу; це змінює умови виходу продуктів у повітря, але не робить процес автоматично безвідходним.

5.2. Важливість конкретного складу матеріалів

Для хімічного опису виділень необхідно знати хоча б основний метал, присадний матеріал, тип покриття або флюсу, газ і характер виконуваної операції. Інформацію беруть із технічної документації та документів щодо конкретних матеріалів. Без цих відомостей не можна коректно переносити склад аерозолі одного процесу на інший.

Таблиця 26.3. Порівняння шляхів утворення продуктів

Процес	Додаткові речовини в реакційній зоні	Що може впливати на продукти
Зварювання суцільним дротом у газі	Захисний газ і присадний метал	Склад газу та дроту
Ручне дугове зварювання	Метал, покриття, шлак	Розклад покриття й випаровування
Зварювання порошковим дротом	Метал оболонки й шихта	Компоненти шихти та газоутворення
Зварювання під флюсом	Флюс, шлак, метал	Взаємодії шлак — метал і умови укрітня

Джерела розділу: [1, розд. 6–8].

6. Поширення аерозолів і газів та принципи їх вилучення

6.1. Чому дим і газ контролюють по-різному

Тверді частинки аерозолі та молекули газів по-різному поведуться в повітряному потоці. Частинки можуть затримуватися придатними фільтрувальними матеріалами; гази потребують інших методів відділення, наприклад відповідної сорбції або спеціально спроектованого видалення. Затримування видимого пилу саме по собі не доводить відсутності газоподібних забруднень.

Захисний газ біля зварювальної ванни потрібен для ізоляції розплаву від повітря, а не для очищення повітря робочого приміщення. З цієї причини газовий захист і місцеве видалення забрудненого повітря виконують різні функції. Ефективність реальної системи визначають за вимірюваннями, проектом та інструкціями з охорони праці.

6.2. Виробничий матеріальний баланс

Для навчального розгляду можна розподілити загальну масу утворених твердих частинок на частину, вилучену системою очищення, та частину, що залишилася невловленою. Це лише спрощений баланс: у реальному приміщенні також можливі осадження, повторне піднімання частинок та інші потоки.

$$m_a = m_v + m_n \quad (26.6)$$

$$\eta = m_v / m_a \cdot 100 \% \quad (26.7)$$

Тут m_a — маса утвореного аерозолі, m_v — маса вловлених частинок, m_n — невловлена маса, η — умовна частка вилучення. Значення η для конкретного обладнання не можна вважати нормативним або сталим без паспортних даних та перевірки умов роботи.

Джерела розділу: [1, розд. 1, 3.3 і 6]; [2, підрозд. 6.8].

7. Навчальні розрахунки для характеристики виділень

7.1. Інтенсивність утворення твердого аерозолі

У найпростішій навчальній моделі, якщо за час t утворилася маса m_a аерозолі, інтенсивність утворення визначається діленням маси на час. За наявності даних про частку окремого компонента можна знайти і його масу у загальному потоці. Такий спосіб корисний для читання результатів вимірювань, але сам собою не встановлює концентрацію речовини біля органів дихання працівника.

$$q_a = m_a / t \quad (26.8)$$

$$m_i = w_i \cdot m_a \quad (26.9)$$

Тут q_a — масова швидкість утворення аерозолі, w_i — масова частка компонента, m_i — його маса. Під час переходу між грамами, міліграмами, хвилинами та годинами необхідно спочатку узгодити одиниці вимірювання.

7.2. Чим концентрація відрізняється від маси виділень

Якщо відома виміряна маса речовини в пробі повітря та відібраний об'єм, визначають середню концентрацію для цієї проби. Її не можна автоматично прирівнювати до персонального впливу на працівника чи середньозмінної концентрації: для таких висновків потрібна належна методика відбору проб.

$$c = m_i / V \quad (26.10)$$

Формула $c = m_i/V$ є загальним хімічним співвідношенням. Для порівняння з будь-якими обов'язковими граничними значеннями потрібно окремо встановити речовину, тривалість відбору проб, одиниці вимірювання та чинний нормативний документ.

Джерела розділу: [2, тема 6]; [1, розд. 3.3].

8. Підсумки та питання для самоперевірки

Зварювальний аерозоль — не один газ і не одна чиста речовина. Його тверда складова пов'язана з випаровуванням, конденсацією та хімічним перетворенням компонентів металу й зварювальних матеріалів; газова складова може містити продукти розкладу, окиснення та високотемпературних газових реакцій. Для правильного опису необхідно розрізняти механізм утворення, склад і шляхи контролю кожної групи продуктів.

На рівні фахового молодшого бакалавра достатньо вміти розпізнавати основні групи продуктів, складати прості рівняння реакцій і виконувати баланс утвореного та вловленого аерозолю за заданими умовами. Конкретні концентрації, токсикологічні оцінки й параметри промислової вентиляції встановлюють за окремими технічними документами та вимірюваннями.

Питання для самоперевірки

1. Чим твердий аерозоль відрізняється від газоподібного продукту?
2. Які ділянки реакційної зони можуть бути джерелами парів металу?
3. Чому склад диму залежить від покриття електрода та присадного дроту?
4. Які реакції можуть призводити до утворення CO і NO?
5. Чому захисний газ не замінює місцевого видалення забрудненого повітря?
6. Які вихідні дані потрібні для визначення маси невловленого аерозолю?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1, 3.1, 3.3, 4, 6–8.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6, підрозд. 6.8.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Неорганічна хімія. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про метали та сполуки Нітрогену.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про хімічні властивості газів і сполук неметалів.

ХІМІЧНА БЕЗПЕКА ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

1. Хімічна безпека та екологічні аспекти зварювального виробництва

Хімічна безпека зварювального виробництва пов'язана з властивостями металів, газів, електродних покриттів, флюсів, засобів очищення й захисних покриттів. Кожна з цих груп речовин може бути корисною для процесу зварювання, але за інших умов створювати небажані продукти або потребувати спеціального поводження. Тому хімічні знання допомагають пояснити, звідки виникає небезпека і чому важливо контролювати склад матеріалів та продуктів їх перетворення.

Екологічний аспект не обмежується димом біля дуги: залишаються шлак, пил, використані хімічні розчини, матеріали для очищення та відходи покриттів. Частина цих потоків підлягає подальшому використанню, а інша — спеціальному збиранню та поводженню відповідно до фактичного складу.

Цей конспект пояснює хімічні основи запобігання забрудненню, а не замінює інструктаж, оцінку професійного ризику або чинні вимоги до газового обладнання, вентиляції та поводження з відходами. Числові нормативи не наводимо, оскільки їх застосовують за конкретними речовинами, умовами та актуальними документами.

Джерела розділу: [1, розд. 1 і 6–8]; [2, розд. 1, 11–12].

2. Хімічні чинники під час роботи з горючими та захисними газами

2.1. Горіння, окиснення та утворення побічних продуктів

Кисень підтримує горіння, але сам не є горючим газом. У паливно-кисневому полум'ї ацетилен або інший горючий газ взаємодіє з киснем із виділенням теплоти. Якщо окиснення відбувається неповністю, можуть утворюватися СО та інші проміжні продукти. Тому хімічно повний склад продуктів не можна визначати лише за назвою палива.



Наведені рівняння демонструють можливі граничні шляхи окиснення вуглецю. Вони не задають складу атмосфери реального робочого місця; для цього важливі умови горіння, відведення продуктів, кількість повітря та вимірювання.

2.2. Захисний газ і повітря робочої зони

Аргон та інші захисні гази подають до зварювальної ванни, щоб зменшити контакт розплаву з атмосферними компонентами. Це корисно для формування шва, проте хімічна інертність газу щодо металу не означає, що його необмежене накопичення в приміщенні безпечне. Правильна організація повітрообміну та перевірка газової системи належать до окремих вимог безпеки.

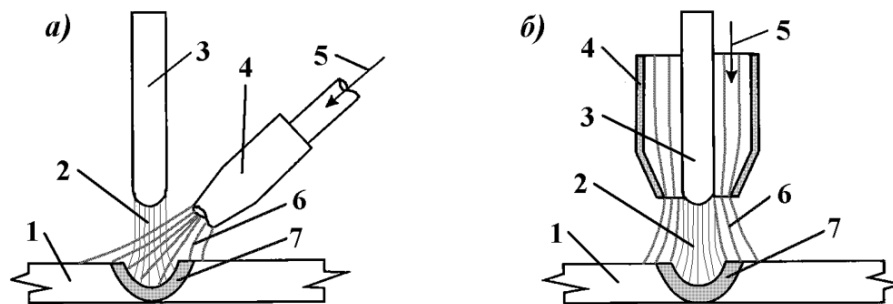


Рис. 27.1. Схеми подачі захисного газу до дуги та ванни; захист металу і очищення повітря — різні задачі

Джерела розділу: [1, розд. 4, 6]; [3, тема 10 «Газоподібне паливо»].

3. Продукти високотемпературних реакцій і повітря робочої зони

3.1. Тверді частинки й газу

Джерела утворення диму — нагрітий метал, електрод, покриття та флюс. Під час охолодження частина речовин із газової фази утворює тверді частинки; поруч можуть перебувати газу, що не затримуються звичайним механічним фільтруванням твердих домішок. Для розуміння ризиків необхідно не плутати кількість видимого диму з повною кількістю газоподібних продуктів.

Якщо до складу матеріалів входять різні легувальні елементи або покриття, хімічний склад можливих викидів змінюється. Одне виробниче приміщення може мати кілька джерел різних речовин: зварювальні пости, операції очищення та ділянки нанесення покриттів.

3.2. Принцип розділення джерела і працівника

Газовий захист розплавленого металу не вирішує питання видалення забруднень із повітря. Для цього передбачають відповідні інженерні заходи, зокрема місцеве вилучення продуктів біля джерела і контроль роботи систем. Конкретні параметри визначають на підставі проєкту й вимірювань, а не за умовним універсальним значенням для будь-якого виду зварювання.

Таблиця 27.1. Хімічні об'єкти контролю в зоні робіт

Об'єкт	Приклад	Чому потрібні різні підходи
Тверді частинки	Оксиди з металу й покриття	Уловлювання та аналіз складу частинок
Газові продукти	CO, CO ₂ та інші газу процесу	Контроль газової фази окремо від пилу
Захисний газ	Ar або суміші	Контроль подачі та повітрообміну

Об'єкт	Приклад	Чому потрібні різні підходи
Пари допоміжних речовин	Компоненти засобів очищення і покриття	Залежність від складу конкретного продукту

Джерела розділу: [1, розд. 1, 3.3, 4 і 6]; [3, підрозд. 6.8]. [4, розд. про правила безпеки]

4. Хімічна підготовка поверхонь і відпрацьовані розчини

4.1. Знежирення та видалення оксидних плівок

До зварювання поверхні можуть містити мастила, забруднення, оксиди та продукти корозії. Для очищення застосовують передбачені технологією механічні й хімічні способи. Хімічні засоби відрізняються за властивостями: мийні розчини містять активні компоненти, а кислотні засоби можуть розчиняти оксидні плівки та за певних умов взаємодіяти з самим металом.

Наприклад, взаємодія кислоти з активним металом може супроводжуватися виділенням водню. Це причина розрізняти видалення оксидів і небажане травлення основного матеріалу; практичні режими та сумісність реагентів визначають лише за конкретною технологічною інструкцією.



4.2. Чому відпрацьований розчин не дорівнює вихідному

Після використання очищувальна рідина може містити не тільки вихідні реагенти, а й солі розчинених металів, залишки мастил та інші продукти. Тому поводження з нею визначають за фактичним складом. Неприпустимо в навчальній моделі вважати, що просте розведення водою автоматично робить такий розчин придатним до скидання.

Для навчальної характеристики складу корисно розрахувати масову частку реагенту в початковому розчині. Однак значення після очищення потребує аналізу, якщо реагент витрачався в реакції або з'явилися нові речовини.

$$w = m_p / m_r \cdot 100 \% \quad (27.4)$$

Джерела розділу: [2, розд. 6, 11–12]; [3, теми 4, 6 і 8].

5. Шлак, залишки електродів, пил і тверді відходи

5.1. Звідки виникає шлак

При зварюванні покритими електродами, порошковим дротом або під флюсом утворюється шлакова фаза — розплавлена суміш оксидів та інших сполук. Вона бере участь у захисті та хімічному очищенні металу, а після охолодження утворює шлакові залишки. Їхній склад залежить від рецептури флюсу або покриття, складу металу й реакцій, що відбулися під час зварювання.

Відходи різних процесів не слід автоматично об'єднувати в одну категорію за зовнішнім виглядом. Наприклад, пил із системи очищення повітря та знята шлакова кірка можуть мати різне співвідношення компонентів і різні шляхи подальшого поводження.

5.2. Зменшення втрат та облік потоків

Роздільне збирання металевих залишків, шлаку, пилу й допоміжних матеріалів спрощує облік і не допускає невиправданого змішування речовин із невідомою сумісністю. Можливість повторного використання чи передавання на перероблення визначається фактичними характеристиками потоку та вимогами до приймання матеріалу.

Таблиця 27.2. Хімічна характеристика окремих потоків

Потік	Можливі складники	Підстава для подальших дій
Шлак	Оксиди та солі металів	Склад флюсу й результати аналізу
Залишки електродів	Метал, покриття	Склад електродних матеріалів
Пил з уловлювача	Суміш твердих частинок	Результати контролю складу пилу
Відпрацьований розчин	Реагент, солі металів, забруднення	Дані аналізу рідини

Джерела розділу: [1, розд. 6–8]; [2, розд. 1 і 11].

6. Захисні покриття та екологічна роль протикорозійного захисту

6.1. Захист конструкції як запобігання втратам металу

Корозія призводить до витрати металу, потреби в ремонті та заміні конструкцій. За несприятливих умов корозійні пошкодження промислового обладнання можуть спричинити аварії та додаткове забруднення навколишнього середовища. Отже, якісна підготовка й захист зварних конструкцій мають не лише економічне, а й екологічне значення.

6.2. Сам захисний матеріал теж має хімічні властивості

Під час вибору покриття потрібно враховувати як його бар'єрну або електрохімічну функцію, так і склад матеріалу для нанесення. У посібнику з корозії розглянуто питання застосування органічних розчинників, хроматів, деяких металевих покриттів і перехід до окремих водорозчинних систем. Це не означає, що один тип фарби підходить усім зварним конструкціям: сумісність, довговічність та екологічні характеристики перевіряють для конкретного виробу.

Під час ремонтного зварювання старі захисні покриття можуть потребувати спеціальної підготовки або видалення за передбаченою технологією. Зняті залишки покриття, пил після очищення та використані розчинники розглядають як окремі потоки, а не змішують із чистим металевим брухтом без визначення складу.

6.3. Екологічне мислення для майбутнього фахівця

Під час оцінювання способу захисту доречно враховувати життєвий цикл конструкції: підготовку поверхні, нанесення покриття, довговічність, ремонт і поводження з відходами. Такі міркування дозволяють бачити зв'язок між хімією матеріалів, якістю зварювання та запобіганням забрудненню.

Джерела розділу: [2, розд. 1, 6 і 11–12].

7. Навчальний матеріальний баланс відходів і очищення

7.1. Баланс утворених і вловлених частинок

Для простих розрахунків масу твердих частинок, що утворилися під час певної операції, розділяють на вловлену та невловлену частини. Знаючи загальну масу та задану частку вилучення, можна обчислити обидві складові. Таке завдання формує навичку матеріального балансу, але не є розрахунком промислової вентиляції чи нормативної відповідності викиду.

$$m_u = m_a \cdot \eta \quad (27.5)$$

$$m_n = m_a \cdot (1 - \eta) \quad (27.6)$$

Тут m_a — утворена маса частинок, η — частка вилучення у частках одиниці, m_u — вловлена і m_n — невловлена маса. Не можна підставляти відсотки без переведення їх у частки одиниці. У реальному виробництві до балансу додають інші шляхи перенесення й накопичення речовин.

7.2. Баланс вихідного та відпрацьованого очищувального розчину

Якщо потрібно приготувати навчальний розчин відомої маси й початкової масової частки реагенту, його масу визначають звичайним співвідношенням для масової частки. Після використання речовина може витрачатися, а розчин поповнюється продуктами реакцій — тому його подальший склад не слід обчислювати як просте розведення початкового розчину.

$$m_p = w \cdot m_r \quad (27.7)$$

Навчальний розрахунок за цією формулою демонструє облік реагенту. Залишкові концентрації, можливість нейтралізації, очищення чи передавання відходу встановлюють окремо на підставі фактичного складу й відповідної процедури.

Джерела розділу: [3, тема 6]; [2, розд. 11–12]. [5, розд. про кількісні розрахунки]

8. Висновки та питання для самоперевірки

Хімічна безпека та екологічна відповідальність починаються з розуміння складу речовин, які входять у виробництво, та продуктів, що з нього виходять. У зварювальній зоні це метал, шлак і гази; під час підготовки та захисту поверхні — реагенти, розчинені метали, матеріали покриттів і залишки їх видалення. Одне й те саме слово «відходи» може позначати дуже різні за хімічною природою потоки.

Майбутньому фаховому молодшому бакалавру важливо розрізняти хімічну причину небезпеки й організаційні вимоги для її контролю; читати документацію на матеріал, розуміти матеріальний баланс і не переносити навчальні припущення на реальні виробничі рішення без перевірки складу, інструкцій та чинних вимог.

Питання для самоперевірки

1. Чим хімічна роль захисного газу відрізняється від функції вентиляції?
2. Чому неповне горіння може змінювати склад газових продуктів?
3. Які речовини можуть з'явитися у відпрацьованому травильному розчині?
4. Чому шлак і пил з уловлювача не слід ототожнювати?
5. У чому полягає екологічне значення захисту зварної конструкції від корозії?
6. Які дані потрібні для навчального балансу утворених і вловлених частинок?

Використані джерела

[1] Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 1, 4, 6–8.

[2] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 1, 6, 11–12.

[3] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 4, 6, 8, 10.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про хімічні властивості речовин і правила безпеки.

[5] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії: для лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Вступ: безпечна робота з хімічними речовинами та матеріальний баланс.

ЗАГАЛЬНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019.

2. Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.

3. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023.

4. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026.

5. Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії: для лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХПІ», 2017.

6. Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016.
7. Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017.
8. Коперсак В. М. Фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.
9. Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.