

**О. К. Горлов, Є. П. Рогачов, С. М. Лашко**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.**

**ЗВАРЮВАННЯ**

**Частина 1**

2010

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет Ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**О. К. Горлов, Є. П. Рогачов, С. М. Лашко**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.**

**ЗВАРЮВАННЯ**

**Частина 1**

**Харків «ХАІ» 2010**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет Ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**О. К. Горлов, Є. П. Рогачов, С. М. Лашко**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.**

**ЗВАРЮВАННЯ**

**Частина 1**

**Харків «ХАІ» 2010**

УДК 62.002:621.791

Горлов О. К. Фізико-хімічні основи технологічних процесів. Зварювання: навч. посібник / О. К. Горлов, Є. П. Рогачов, С. М. Лашко. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т „Харк. авіац. ін-т”, 2010 – Ч.1. – 72 с.

Викладено фізико-хімічні основи зварювання плавленням. Дано уявлення про сукупність металургійних процесів, що впливають на утворення з'єднань. Показано принципові труднощі, які перешкоджають утворенню зварних з'єднань. Описано закономірності атомно-кристалічної будови металів з позицій утворення нерознімного з'єднання, металургійні процеси при різних способах захисту зони зварювання.

Для студентів механічних спеціальностей при самостійному вивченні відповідних розділів курсів „Зварювання в авіації”, „Фізико-хімічні основи технологічних процесів”.

Іл. 25. Табл. 24. Бібліогр.: 9 назв.

Рецензенти: канд. техн. наук М.Ф. Савченко, О.Ю. Шигімага

© Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
„Харківський авіаційний інститут”, 2010

© О. К. Горлов, Є. П. Рогачов, С. М. Лашко, 2010

## ВСТУП

Зварювання є одним з провідних технологічних процесів створення матеріальної основи сучасної цивілізації. До 70% світового використання сталевого прокату йде на виробництво зварних конструкцій і споруд.

Зварювання можна використовувати для з'єднання практично будь-яких металів і неметалів (пластмас, скла, кераміки та ін.) в будь-яких умовах – на землі, в морських глибинах і космосі. Товщина зварюваних деталей становить від мікрометрів до метрів, маса зварних конструкцій – від часток грама до сотень і тисяч тонн.

Часто зварювання є найбільш ефективним або єдиним способом створення нерознімних з'єднань конструкційних матеріалів і ресурсозберігаючих заготовок, максимально наближених за геометрією до оптимальної форми готової деталі або конструкції.

Утворення зварного з'єднання у зв'язку з уведенням концентрованої енергії в його зону супроводжується комплексом складних фізичних і хімічних процесів, що відбуваються одночасно, основними з яких є:

- розплавлення основного і електродного металів, їх перемішування;
- дифузія елементів у зоні контакту твердого й рідкого металів;
- хімічні реакції, що здійснюються у газовій і рідкій фазах і на їхніх межах;
- кристалізація розплавленого металу в об'ємі зварювальної ванни та в зоні плавлення;
- теплова дія на метал в зоні термічного впливу, утворення власних зварювальних напружень і деформацій та ін.

Фізико-хімічні процеси, що відбуваються при зварюванні, відрізняються від аналогічних процесів, характерних для виплавлення сталі, такими особливостями:

- швидкостями і напрямом реакції, що пов'язано з високою температурою в зоні зварювання;
- невеликим об'ємом рідкого металу в зварювальній ванні;
- короткочасністю існування металу в розплавленому стані та ін.

Велике значення має також енергійна безперервна фізична й хімічна взаємодія розплавленого металу з газовою атмосферою, шлаками, основним металом. Внаслідок цього склад зварного шва може відрізнитися від складів електродного і основного металів.

Вплив фізико-хімічних процесів, які відбуваються в зварному шві, на якість з'єднання є настільки значним, що слід розглянути це питання детальніше.

# 1 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

## 1.1 Загальні відомості

Існує три стани речовини, що розрізняються між собою силами взаємодії атомів і молекул: твердий, рідкий і газоподібний. Перехід речовини з одного стану в інші супроводжується значними витратами енергії, що прикладаються зовні.

Для твердого й рідкого станів є характерними невеликі відстані між молекулами, між якими діють сили взаємного притягання. При переході речовини в рідкий, а потім у газоподібний стан ці відстані збільшуються, а сили їхньої взаємодії знижуються. Цей процес наочно можна спостерігати під час зварювання, коли метал плавиться, частково переходить у газоподібний стан, а потім виникають зворотні процеси, названі кристалізацією.

Процес плавлення металу в зоні зварного шва викликає виникнення складних фізико-хімічних процесів й утворення характерного з'єднання, що відрізняється за своєю структурою від основного металу.

До фізичних належать процеси, які, змінюючи фізичні властивості речовини, не змінюють будову елементарних часток, з яких складається ця речовина, а також її хімічні властивості.

До таких процесів належать:

- електричні, теплові, механічні явища в джерелах нагрівання;
- проходження електричного струму й теплові коливання кристалічних ґраток;
- перехід основної й електродної речовини з твердого стану в рідкий (плавлення), перемішування їх між собою, кристалізація металу в зоні зварювальної ванни;
- напруги й деформації, що виникають у кристалічних ґратках зварного шва й прилеглий до нього зоні основного металу.

Хімічні процеси змінюють будову елементарних часток, з яких складається ця речовина, у результаті чого створюються нові речовини з новими хімічними й фізичними властивостями.

До основних хімічних процесів належать хімічні реакції в газовій і рідкій фазах, на межах фаз (газової з рідкою, газової з твердою, рідкої з твердою) при взаємодії компонентів покриттів, флюсів, захисних газів з рідким металом з утворенням окислів, шлаків та інших сполук, що відрізняються своїми хімічними властивостями від основного металу.

Фізичні й хімічні процеси при зварюванні поєднані в часі й просторі, тому їх можна віднести до загального поняття – фізико-хімічні процеси.

## 1.2 Принципові труднощі, що перешкоджають утворенню зварних з'єднань

Відповідно до другого закону термодинаміки кожна система прагне прийти в стан, при якому вона має мінімальний запас внутрішньої енергії. Однією зі складових внутрішньої енергії є поверхнева енергія. Чим менше величина поверхневої енергії, тим система є більш стійкою. При утворенні зварного з'єднання зменшується поверхня деталей, отже, й величина поверхневої енергії. Тому теоретично процес утворення зварного з'єднання має відбуватися мимовільно й з виділенням енергії. Однак на практиці для створення зварного з'єднання доводиться витратити енергію величиною до  $10^3 \dots 10^4$  Дж/моль. Причиною цього є ряд проблем.

У твердому металі атоми розташовуються в певному порядку, утворюючи кристалічні ґрати. Кожний вид кристалічних ґрат металу характеризується параметром  $a$ , тобто відстанню між сусідніми атомами. Для більшості металів параметр кристалічних ґрат становить  $(3 \dots 5) \text{Å}$  ( $1 \text{Å} = 10^{-10} \text{м}$ ). Отже, для забезпечення міжатомних зв'язків між поверхневими атомами деталей, що зварюють, необхідно їх зблизити на величину параметра кристалічних ґрат, тобто приблизно на  $1 \text{Å}$ .

Однак навіть при самому якісному механічному обробленні поверхні металів (шліфуванні, поліруванні) висота мікронерівностей поверхні становить  $(10^3 \dots 10^4) \text{Å}$ . У цих умовах фізичний контакт деталей, що зварюють, здійснюється тільки на окремих мікронерівностях, що не забезпечує необхідної міцності з'єднання.

Крім того, утворенню зварного з'єднання перешкоджають окисні плівки, забруднення на поверхні деталей. Усередині металу кожний атом утримується у своєму положенні силами зв'язку з симетрично розташованими щодо оточуючих його з усіх боків атомами. На вільній поверхні кристала або рідини атом виявляється неврівноваженим внаслідок відсутності зв'язку з одного або двох напрямків. Ця обставина обумовлює підвищення енергії поверхневого шару. Досить  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  с, щоб валентні зв'язки поверхневих атомів виявилися насиченими внаслідок взаємодії з навколишнім середовищем. Товщина поверхневих забруднень, отриманих за допомогою молекулярних сил взаємодії поверхневих атомів (сил Ван-дер-Ваальса), дорівнює величині  $10^3 \dots 10^4 \text{Å}$ . Отже, крім необхідності забезпечити фізичний контакт на всій поверхні з'єднання деталей, що зварюють, треба спочатку очистити ці поверхні від різноманітних забруднень.

Існує ще й третя проблема у встановленні міжатомної взаємодії деталей. Кожний атом, що знаходиться всередині кристала, утримується симетрично спрямованими силами. На вільній поверхні, як уже було відзначено вище, атом є неврівноваженим внаслідок відсутності

або ослаблення зв'язків із зовнішнім середовищем. Тому поверхневий атом буде мати більший запас потенційної енергії.

З'єднання деталей зі знищенням вільної поверхні має супроводжуватися звільненням енергії. Для зміни положення атом має перебороти енергетичний бар'єр. Для цього йому потрібно надати додаткову енергію. Ця енергія називається енергією активації, завдяки якій підвищується енергія атомів до рівня «бар'єра» схоплювання.

Енергія активації витрачається на подолання сил відштовхування, що виникають між зближуваними поверхневими атомами. Коли відстань між ними буде дорівнювати міжатомним відстаням у ґратах кристалів, виникнуть квантові процеси взаємодії електронних оболонок атомів. Після цього загальна енергія системи почне зменшуватися до рівня, що відповідає енергії атомів у ґратах цілого кристала. Чим вище температура, тим меншою буде необхідна енергія активації.

Отже, процес зварювання має кілька стадій. На першій стадії розвивається фізичний контакт до рівня, необхідного для міжатомної взаємодії. На другій стадії відбувається хімічна взаємодія з утворенням з'єднання. У макрообсягах процес зварювання завершується третьою стадією – дифузією атомів углиб тіла.

Всі існуючі способи зварювання – це різні технологічні прийоми подолання принципних труднощів, що перешкоджають об'єднанню кристалів.

Енергія активації може передаватися зварюваним деталям у вигляді:

- теплоти (термічна активація);
- пружно-пластичної деформації (механічна активація);
- електронного, іонного й інших видів опромінення (радіаційна активація).

Найчастіше застосовують який-небудь один з перших двох видів активації або обидва разом.

Енергія при зварюванні витрачається на таке:

- пружну й пластичну деформації, необхідні для зближення поверхонь, що з'єднують;
- обривання зв'язків між атомами тіла й молекулами (атомами) зовнішнього середовища, що насичують їхні вільні зв'язки;
- підвищення енергії поверхневих атомів до рівня енергетичного «бар'єра» схоплювання, тобто для переходу їх в активний стан.

При зварюванні тиском якісне нероз'ємне з'єднання утвориться при зближенні зварюваних поверхонь на відстань, що дозволяє реалізуватися силам міжатомної взаємодії і установити електронний обмін між збудженими (активованими) атомами на цих поверхнях. Тому для цього виду зварювання мають значення природа атомів, що вступають



у контакт, умови активації атомів і чинники, що перешкоджають активації, а також характер міжатомних зв'язків зварюваних поверхонь.

При зварюванні плавленням для спільної кристалізації металу шва і оплавленого металу деталей, що зварюють, має значення характер взаємодії атомно-кристалічних ґрат у твердо-рідинному і твердому станах, природа зв'язків та інше, що пов'язане з атомно-кристалічною будовою цих металів.

Різноманіття хімічних і фізичних властивостей елементів і, в тому числі, здатність атомів до взаємодії з утворенням зв'язку того або іншого ступеня міцності, визначається різницею в електронній будові.

### **1.3 Закономірності атомно-кристалічної будови металів**

Елементарною комплексною основою елементів, в тому числі металів, є атом, що складається з позитивно зарядженого ядра й негативно заряджених електронів, що обертаються на різній відстані від ядра. У цілому атом є електрично нейтральним.

Електрони в атомах знаходяться на різній відстані від ядра, що визначає їхній енергетичний рівень і міцність зв'язку з ядром. Чим ближче розташовані один до одного протилежно заряджені ядро і електрони, тим сильніше вони взаємно притягаються. Крім різної відстані від ядра, стан електронів визначається орбітами, вздовж яких вони обертаються. Орієнтування орбіт у просторі може бути різним. Такі орбіти можуть бути круговими з ядром у центрі й еліптичними з різним ступенем еліптичності. Крім того, сам електрон обертається навколо своєї осі й напрямок цього обертання може бути в різних електронів різним.

Стан та енергія електронів в атомі визначаються чотирма квантовими числами. *Головне квантове число  $n$*  характеризує енергію й розмір електронної орбіталі й збігається з номером періоду елемента в періодичній системі елементів Д. І. Менделєєва. Воно може набувати цілих значень від 1 до 7, що свідчить про можливість наявності в різних елементах від одного до семи головних енергетичних електронних рівнів. *Орбітальне квантове число  $l$*  визначає енергію, орбітальний момент кількості руху та форму орбіталі (змінюється від 0 до  $n-1$ ). *Магнітне квантове число  $m_l$*  характеризує просторове положення тієї або іншої орбіталі, а також магнітний момент електрона відносно ядра. Воно змінюється від  $-l$  до  $+l$  й має значення тільки цілих чисел. *Спінове квантове число* характеризує власне обертання електрона навколо своєї осі, має тільки два значення:  $+1/2$  й  $-1/2$ . Обертання може бути в одну або іншу сторону.

В атомі не може бути двох електронів з однаковими чотирма числами (принцип заборони Паулі).

Енергетичні показники зв'язку між електронами і ядром, а також зв'язок між собою атомів тих же самих елементів й атомів різних елементів залежать від загального числа електронів в атомі, їхнього розташування за електронними рівнями, від ступеня заповнення електронних рівнів або підрівнів, загального числа електронних рівнів, стану останнього зовнішнього електронного рівня, а також від того, чи є спіни сусідніх електронів цього підрівня і особливо електронів зовнішньої оболонки взаємно врівноваженими.

Відповідальними за створення міжатомного зв'язку, що характеризується прагненням атома одержати завершену електронну оболонку, є зовнішні електрони, що найслабкіше пов'язані з ядром. Кількість цих електронів визначає валентність атома, а ступінь заповнення зовнішньої оболонки – його активність або здатність вступати в з'єднання з іншими атомами. Там, де зовнішня оболонка повністю заповнена, атом речовини виявляється практично пасивним до утворення зв'язків.

Здатність атомів тієї ж самої речовини або різних речовин з'єднуватися один з одним у міцний агрегат – утворювати нероз'ємне з'єднання – є найважливішим чинником при зварюванні металів і особливо при зварюванні тиском у твердому стані.

Серед багатьох показників, пов'язаних з особливостями атомної будови металів, для зварювання найбільше значення мають такі:

- міцність зв'язку найлегше відокремлюваних електронів зовнішньої оболонки з ядром або іоном;
- тип і міцність зв'язку між атомами;
- показник вільної енергії поверхні.

Атоми різних елементів відрізняються між собою кількістю електронних оболонок (енергетичних рівнів, на яких розташовані електрони). Чим більше головне квантове число електронної оболонки, тим далі електрони розміщені від ядра, тим більшою є їхня вільна енергія, тим слабкіше вони пов'язані з ядром.

Має значення не тільки збільшення відстані цих електронів від ядра й зменшення сили взаємодії електрона і ядра, але й вплив проміжних електронних оболонок. Електрони зовнішніх оболонок в атомі можуть при відповідних умовах віддалятися від ядра, взагалі його залишати, переходячи, наприклад, до іншого атома, у якого зовнішня оболонка має більш низький енергетичний рівень і вільне місце (незаповнене). Таким чином, одним з факторів, що визначають з'єднання атомів, є енергетичний стан електронів на зовнішній оболонці – валентних електронів: чим слабкіше вони пов'язані з ядром цього атома, тим легше переходять до утворення зв'язку з іншим атомом.

Велике значення для міцності зв'язку зовнішніх електронів з

атомом має ступінь заповнювання зовнішньої оболонки. Чим повніше заповнена зовнішня оболонка, тим міцніше закріплені на ній електрони. Атоми з одним електроном на зовнішній оболонці легше всього його віддають.

На міцність закріплення зовнішнього електрона у «свого» атома також впливає утворення замкнутих магнітних полів, створюваних спінами електронів (обертанням електронів навколо своєї осі). Якщо атом має два зовнішні електрони з антипаралельними спінами (що обертаються в різних напрямках), тобто четверте квантове число у одного  $-1/2$ , у іншого  $+1/2$ , то магнітні поля, що створюються при обертанні електрона, утворюють більш замкнуте магнітне поле, що сприятиме утриманню кожного з електронів. Якщо розглядати з'єднання двох різних атомів (зварювання різних металів), то наявність на зовнішніх оболонках атомів з протилежними спінами має обумовлювати утворення врівноважених магнітних полів і поліпшення зварюваності.

Сила, з якою утримується електрон у «своєму» атомі (мова звичайно йде про зовнішні електрони), визначається іонізаційним потенціалом – напругою, яку необхідно прикласти, щоб відірвати електрон і зробити атом позитивно зарядженим іоном. Іонізаційний потенціал є важливим показником здатності атомів до встановлення міжатомних зв'язків. В атомі може бути кілька іонізаційних потенціалів відповідно до того, скільки у нього електронів на зовнішній оболонці і який за рахунком електрон відривається. Чим нижче потенціал іонізації атома, тим легше зробити атом активним для встановлення зв'язку. Так, серед металів, що використовують у техніці, легше всього мають зварюватися у твердому або пластичному стані деталі з алюмінію (іонізаційний потенціал – 5,98 еВ), трохи складніше – титан (6,82 еВ), потім – ніобій (6,88 еВ), молібден (7,1 еВ), свинець (7,42 еВ), срібло (7,57 еВ), нікель (7,63 еВ), магній (7,64 еВ), мідь (7,72 еВ), залізо (7,8 еВ), вольфрам (7,98 еВ).

Найбільш високі потенціали іонізації мають елементи з повністю заповненою зовнішньою оболонкою (інертні газы). Найнижчі потенціали мають елементи з найменш заповненими оболонками. У міру збільшення атомного номера елемента виявляється екранованим вплив внутрішніх електронних рівнів.

Для міцності міжатомного зв'язку велике значення має його тип, тобто спосіб і принцип з'єднання атомів між собою. Основою міжатомного зв'язку й, отже, утворення нероз'ємних з'єднань є взаємодія електронів, а рушійною силою цієї взаємодії – прагнення атомів одержати завершені електронні оболонки та досягти найбільш стійкого розподілу електронів за рівнями й підрівнями. Таким чином, при взаємодії кожен з атомів різних речовин шляхом віддачі або захвату електронів

прагне придбати найближчу йому стійку електронну будову.

### 1.4 Сили зв'язку в твердих тілах

Розгляд природи зв'язку між атомами має першорядне значення як для розуміння умов утворення різних з'єднань, в тому числі зварних, так і для розроблення нових процесів і нових видів зварних з'єднань.

**Іонний зв'язок.** Усі іонні кристали являють собою хімічні сполуки. Іонний зв'язок (рис. 1,а) утворюється між атомами двох видів: одні з них легко втрачають електрони, створюючи позитивно заряджені іони – катіони, інші – легко приєднують електрони, утворюючи негативно заряджені іони – аніони. Іонний зв'язок виникає між по-різному зарядженими атомами.

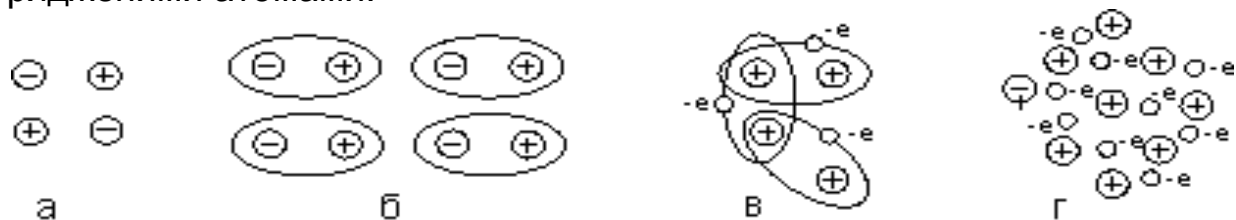


Рисунок 1 – Типи зв'язків між атомами:

а – іонні; б – ковалентні; в – молекулярні; г – металеві

Між утвореними іонами виникають кулонівські сили притягання, які на близьких відстанях урівнюються силами відштовхування між електронними оболонками сусідніх атомів. Ці сили визначають стійкість іонного кристала.

Для іонних кристалів є характерними високі температури плавлення, міцність, твердість, крихкість, теплота сублімації, діаманетичні властивості.

**Ковалентний зв'язок.** Цей зв'язок виникає між атомами з однакою або майже однакою валентністю внаслідок присвоєння парою атомів (рідше більшою кількістю) валентних електронів із протилежно спрямованими спінами (рис. 1,б).

Таке об'єднання створює для електронів загальну орбіту з двома ядрами всередині й може бути безперервним унаслідок того, що різні електрони зовнішньої оболонки спарюються з відповідними електронами різних атомів. У результаті утворюється тверда частка розміром, що залежить від кількості певної речовини.

Для кристалів із ковалентними зв'язками є характерними: високі температура плавлення, теплота сублімації, твердість, пружність, крихкість. За електричними властивостями ковалентні кристали належать до напівпровідників і діелектриків, але в деяких металах також є знач-

на частка ковалентних зв'язків.

Стосовно до зварювання й пайки ковалентні зв'язки встановлюються при з'єднанні металів з неметалами.

**Молекулярний зв'язок** (Ван-дер-Ваальса). Це слабкий електростатичний зв'язок, обумовлений силами притягання між миттєвими електричними диполями, які виникають унаслідок руху електронів в атомах і молекулах. При зближенні атомів електрони кожного з них зміщуються відносно ядра. Внаслідок координації руху електронів в електронних оболонках та індуктивного перерозподілу зарядів відбувається взаємна поляризація атомів і з'являються сили Ван-дер-Ваальса (рис. 1,в).

Сили Ван-дер-Ваальса діють у різних кристалах незалежно від природи атомів, але вони досить слабкі. За наявності значно сильнішої міжатомної взаємодії (іонного, ковалентного або металічного зв'язків) ці сили практично не мають ніякого значення.

Для молекулярних кристалів є характерними низькі температура плавлення й теплота сублимації та високий коефіцієнт термічного розширення.

Нехарактерними для металів є найбільш слабкі міжмолекулярні (Ван-дер-Ваальсові) сили, що використовують при зварюванні пластмас.

**Металевий зв'язок.** Цей зв'язок обумовлено валентними електронами. Вони слабо пов'язані з атомом, рівномірно розподіляються та легко рухаються в просторі між атомами, які з'єднуються в кристал.

Слабкий зв'язок зовнішнього електрона приводить до того, що в атомному агрегаті ці електрони відриваються й безладно блукають між позитивними (тими, які залишилися) іонами, що утворилися (рис.1,г).

Електрони присвоюються не декількома атомами кристала, як у випадку ковалентного зв'язку, а всіма атомами, тобто утворюють електронний "газ", що заповнює весь кристал (рис.1, г). Позитивні іони металу, які виникли внаслідок втрати валентних електронів, утворюють кристалічну ґратку.

На рис. 2 показано характер енергетичної взаємодії двох позитивно заряджених часток рухливих електронів, що знаходяться у полі цієї взаємодії залежно від відстані між цими частками. Сили притягання (зокрема, гравітаційні) при зближенні часток зростають повільніше, ніж сили відштовхування (зокрема, для двох однаково заряджених часток), і при деякій відстані  $r_0$  між частками вони врівноважуються. Потенціальна енергія має мінімум  $U_{\min}$  при деякій відстані  $r_0$ .

Якщо розглянути не окремо взяті дві частки, а значну їхню кількість з певною системою геометричного взаєморозташування, то

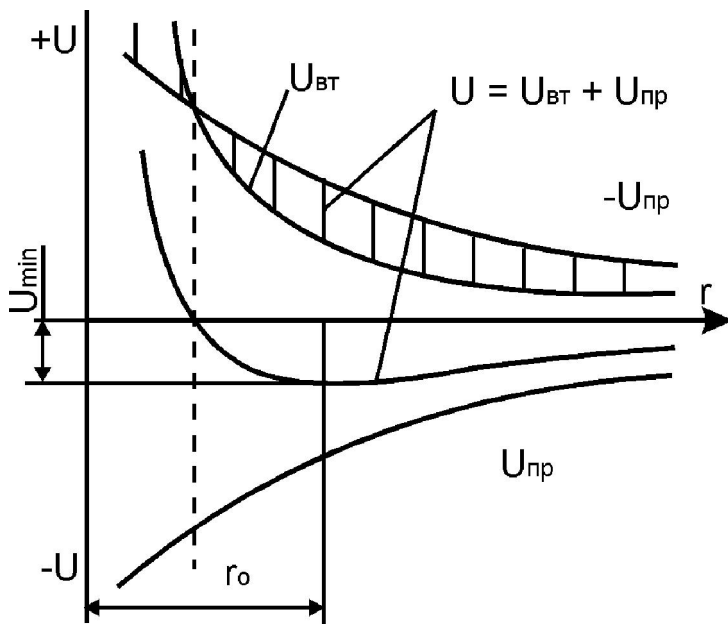


Рисунок 2 – Схема взаємодії двох позитивно заряджених частинок, які знаходяться в полі рухливих електронів

відстань, що є подібною  $r_0$ , буде визначати параметр кристалічної ґратки речовини (металу) при певній температурі. Звичайно для більшості металів параметр кристалічної ґратки становить  $(3...5)10^{-10}$  м.

Відстань  $r_0$  – параметр ґратки – не залишається сталим. Це тільки деяка середня відстань між частками, які коливаються біля свого середнього положення. Звичайно амплітуда коливань при нормальних температурах становить 5...10 % середньої міжатомної відстані й має значні флуктуації. З підвищенням температури ці теплові коливання збільшуються так само, як збільшується параметр ґрат, що в цілому ослаблює взаємозв'язки.

Взаємодія між іонами та валентними електронами визначає стійкість усієї системи.

Утворення металічного зв'язку в кристалах обумовлено двома принципово важливими явищами:

1. Кожний атом набуває структури попереднього інертного газу й виникають відповідні зменшенню енергії сили притягання.

2. Колишні валентні електрони атомів стають узагальненими, тобто утворюється електронний газ, що належить усьому кристалу.

Електронний газ компенсує сили відштовхування між іонами і об'єднує їх у тверде тіло.

Для металів є характерними три основних типи кристалічних ґраток:

1. ОЦК – об'ємно-центрована кубічна ґратка (рис. 3, а). Таку ґратку мають: *Li*, *Na*, *K*, *Ba*, *Cr*, *Mo*, *W*, *V*, *Fe* при температурі більше  $1392^{\circ}\text{C}$  і менше  $911^{\circ}\text{C}$ ;

2. ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка (рис. 3, б). Таку ґратку мають: *Ag*, *Au*, *Pt*, *Cu*, *Al*, *Fe* при температурі  $911...1392^{\circ}\text{C}$ ;

3. ГЦУ – гексагональна щільно упакована ґратка (рис. 3, в). Таку

ґратку мають: *Mg*, *Ti*, *Zn*, *Y*, *Be*, *La*.

Для кристалічних ґраток різних металів є характерною різна відстань між базовими атомами, тобто атомами, що утворюють геометричну фігуру. Наприклад, у кубічних ґраток це – розмір ребра куба – відстань між центрами атомів, що розташовані у його вершинах. Цю відстань називають параметром ґратки, у кубічних ґраток – один параметр *a*, у гексагональної – два: *a* й *c* (див. рис. 3).

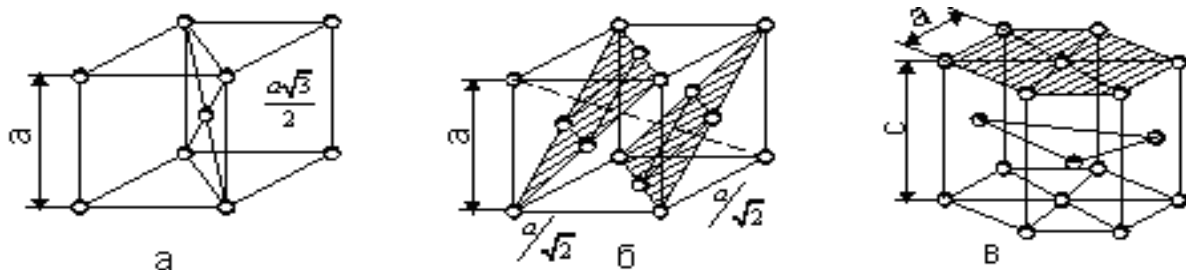


Рисунок 3 – Кристалічні ґратки металів:  
а – ОЦК; б – ГЦК; в – ГЦУ

Фізичні явища, що відбуваються у металах, можна класифікувати таким чином: метал складається з двох підсистем – легкої та важкої. **Легка підсистема** – це колишні валентні електрони атомів металу, що є дуже рухливими й миттєво реагують на будь-яке електромагнітне поле. **Важка підсистема** – це атоми, які в процесі кристалізації втратили свої валентні електрони. У кристалічних металах вони знаходяться у вузлах кристалічної ґратки. В аморфних металах вони не утворюють у просторі правильні геометричні структури, але деякі ознаки впорядкованості в їхньому розташуванні існують. В обох випадках атоми знаходяться у постійному русі. Оскільки валентні електрони стають спільними для всієї важкої системи, то металічний зв'язок не є спрямованим, чим обумовлено пластичність і здатність металу до деформування.

У металах існує три види явищ, що пов'язані з їхньою будовою [10]: явища, в яких легка підсистема (електронний газ) виявляє свої властивості автономно (електропровідність при низьких температурах, парамагнетизм вільних електронів тощо); явища, в яких важка підсистема (атоми) виявляє свої властивості значною мірою незалежно від електронного газу (пластичні властивості, ґраткові теплоємність і теплопровідність, теплове розширення тощо); явища, сутність яких полягає в сильній безпосередній взаємодії легкої й важкої підсистем (електропровідність, надпровідність, електрофізичні властивості у високочастотних полях).

Наведена вище класифікація фізичних явищ у металах є умовною, оскільки не можна відокремити одну підсистему від іншої. Напри-

клад, високу пластичність металів обумовлено самою природою металевого стану, а саме – неспрямованістю металічних зв'язків. Однак така класифікація дозволяє виділити основні риси й характерні особливості явищ. Відповідно виділяють електронні властивості металів (термоелектронну емісію, надпровідність, електричний опір тощо), які пояснюються самою електронною системою і її взаємодією з ґраткою.

Валентна зона металів містить незайняті рівні безпосередньо над рівнем Фермі. При передачі незначної енергії електрони можуть переходити на незайняті рівні, тобто збуджуватися. Низька енергія збудження електронів характеризує тепло- і електропровідність металів.

Присвоювання валентних електронів у металах приводить до того, що в твердому стані металу вони займають більш низькі енергетичні рівні, ніж в ізольованому атомі, і забезпечують енергію зв'язку у твердому тілі аналогічно з утворенням хімічного зв'язку.

Таблиця 1 – Тип і параметр ґратки металів

Метал	Fe	Fe	Ni	Al	Mg	Cu	Cr	W	Ag	Ti
Тип ґратки	ОЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦУ	ГЦК	ОЦК	ОЦК	ГЦК	ОЦК
Параметр ґратки, нм	2,9	3,6	3,5	4	a=3,5 c=5,2	3,6	2,9	3,1	4,1	3,3
Атомний радіус, нм	1,24	1,24	1,25	1,43	1,6	1,28	1,25	1,36	1,44	1,44

При зварюванні однорідних металів, які мають ідентичні кристалічні ґратки, здатність до з'єднання визначається в основному розглянутими закономірностями електронної будови атомів цього металу. При зварюванні різнорідних металів важливого значення набуває їхня атомно-кристалічна будова. Чим меншою є різниця в атомно-кристалічній будові металів, тим легше вони з'єднуються при зварюванні. Схожість атомно-кристалічної будови металів, що з'єднують, означає подібність енергетичного стану їхніх атомів. Це свідчить про те, що атоми одного зварюваного металу здатні енергетично сприятливо розташовуватися в кристалічних ґратках іншого металу. Ознакою цього є рівність величин атомних радіусів, а також подібність типів і параметрів кристалічних ґраток.

### **1.5 Фізико-механічні процеси встановлення міжатомних зв'язків у зварних з'єднаннях**

Існують три основні форми встановлення міжатомних зв'язків при зварюванні металів, кожна з яких є основною для свого класу зварю-



вальних процесів.

Всі зварювальні процеси, що входять до механічного класу зварювання, за винятком зварювання тертям, здійснюються без попереднього нагрівання деталей.

**Холодне зварювання** – один з видів зварювання у стані твердої фази зі значною об'ємною пластичною деформацією. Основним технологічним варіантом цього типу зварювання є спільна пластична деформація деталей, які з'єднують, у результаті прикладення сил, нормальних до поверхні з'єднання. В основі холодного зварювання лежить явище, що одержало назву «схоплювання». Досить часто це явище також називають адгезією (для різнорідних металів) або когезією (для однорідних металів). Для одержання якісного з'єднання є необхідним значне розтікання металу в місці з'єднання, що сприятиме руйнуванню й виносу окисних плівок із зони контакту, згладжуванню поверхневих мікронерівностей та утворенню активних центрів схоплювання в місцях виходу дислокацій та їхніх скупчень.

Ступінь деформації при холодному зварюванні досягає 80...90 %. Для цього необхідно прикладати тиск, що у чотири – п'ять разів перевищує межу плинності зварюваних металів. Тривалість процесу макрооб'ємної деформації звичайно становить 1...2 секунди.

Здатність до схоплювання значною мірою визначається положенням металу в періодичній системі елементів і будовою кристалічних ґрат. В основному, холодним зварюванням з'єднують такі пластичні метали, як алюміній і мідь, хоча його застосовують і для з'єднання різнорідних металів.

При зварюванні вибухом відбувається фізичний контакт між поверхнями, що з'єднують, а наступна електронна їхня взаємодія забезпечує створення міцного металевого зв'язку. Зближення поверхонь на відстань фізичного контакту здійснюється при зварюванні вибухом за допомогою спільної пластичної деформації поверхневих шарів матеріалів.

При термомеханічних способах зварювання (а також при зварюванні тертям) зближення атомів, активація поверхонь (очищення поверхневих шарів і плинність ювенільних шарів металу) досягається завдяки спільній пружньо-пластичній деформації матеріалів, що з'єднують, одночасно з їх нагріванням. З підвищенням температури межа плинності металу зменшується, тому потрібно застосувати набагато менший тиск для забезпечення фізичного контакту деталей, що зварюють, за всією площею стику.

Протікання струму через деталі приводить до поступового нагрівання металу в стику до температури, близької до температури плавлення  $(0,8...0,9)T_{пл}$ . Потім збільшують зусилля стискування деталей, а

струм вимикають. При цьому прискорюється переміщення рухливої деталі, відбувається пластична деформація металу в стику і утворення з'єднання у твердому стані. Безперервний структурний зв'язок здійснюється завдяки спільній (взаємній) рекристалізації металу деталей. Зварне з'єднання має зернисту структуру.

При контактному стиковому зварюванні оплавленням деталі зближують при дуже малому зусиллі й вимкненому джерелі струму. Оплавлення деталей відбувається в результаті безперервного утворення й руйнування контактів – перемичок між їхніми торцями. Перемички нагріваються значно вище температури плавлення, аж до температури кипіння.

Після утворення необхідного шару розплавленого металу на торці деталей, що зварюють, струм вимикають, застосовують осаджувальний тиск. Рідкий метал разом із забрудненнями (окисними плівками) видавлюється зі стику, утворюючи при затвердінні ґрати. З'єднання утворюється між твердими металами, нагрітими до пластичного стану знову ж внаслідок спільної (взаємної) рекристалізації металу деталей.

При точковому контактному зварюванні деталі з'єднуються за окремими зонами стикання, що називають точками. При цьому деталі складають внапуск і стискають електродами, з'єднаними зі зварювальним трансформатором, при вмиканні якого деталі нагріваються короткочасним (0,01...0,5 с) імпульсом струму до появи розплавленої зони або ядра точки. Розплавлений метал утримується в ядрі від вибрикування й надійно захищається від взаємодії з навколишнім середовищем ущільнювальним поясом, який формується в результаті значної пластичної деформації металу, що примикає до ядра.

Зусилля після вимикання струму зберігається якийсь час для того, щоб кристалізація металу відбувалася під тиском, завдяки чому метал захищається від утворення дефектів усадочного походження – тріщин, пухкості та ін.

**Шовне зварювання** – це утворення безперервного зварного з'єднання шляхом поставлення послідовного ряду точок, що перекривають одна одну. Таким способом досягається герметичність зварного з'єднання. При шовному зварюванні, як і при точковому, утворення міжкатодних зв'язків відбувається шляхом взаємної кристалізації розплавленого металу під тиском у замкненому об'ємі.

При зварюванні в рідкій фазі (термічний клас зварювання) зближення атомів здійснюється завдяки явищу змочування й теплових коливань часток. Очищення поверхонь відбувається шляхом відновлення елементів з окислів (термічної дисоціації окислів) при нагріванні, десорбції, металургійному обробленні зварювальної ванни.

Початок контакту металів, що зварюють, тобто встановлення

безперервного структурного зв'язку, відповідає моменту утворення загальної зварювальної ванни. З'єднання відбувається шляхом мимовільного змішування й взаємного розчинення рідкого металу деталей з наступною його кристалізацією на основі частково оплавлених зерен основного металу. Зварний шов має структуру литого, тобто кристалічного або дендритного металу. Отже, при зварюванні плавленням зварне з'єднання утворюється у процесі спільної кристалізації.

При зварюванні деталей з того ж самого матеріалу процеси розчинення, взаємної дифузії, утворення твердих і рідких розчинів, тобто взаємної кристалізації, нічим не обмежені. Більш складна ситуація може виникнути при зварюванні деталей з різнорідних металів. Основними труднощами, що існують при цьому є їхня металургійна несумісність: різні кристалічні будови (тип кристалічних ґраток і величина їх параметрів), температури плавлення, теплофізичні властивості (коефіцієнти лінійного розширення, теплопровідності). У першому наближенні металургійну сумісність можна оцінити за діаграмами стану сплавів. Усі можливі сполучення металів можна поділити на три види.

До першого виду сполучень належать метали, що мають гарну фізичну зварюваність, тобто однакову кристалічну структуру, можуть утворювати безперервні тверді розчини, змішуючись у різних співвідношеннях, тобто здатні створювати загальні кристалічні ґрати. Ці метали належать до тієї ж самої групи або до суміжних груп періодичної системи елементів, наприклад, залізо-нікель, нікель-мідь, хром-ванадій. Тут процеси розчинення й дифузії нічим не обмежені.

До другого виду відносять метали, розходження розмірів атомів яких перевищує 14...15 %, тобто й розчинність їх у твердому стані буде обмеженою (правило Юм-Розері). У сплаві будуть утворюватися тендітні хімічні сполуки – інтерметалоїди. При зварюванні таких пар металів устанавлюється структурний зв'язок внаслідок наявності як кристалічної, так і міжкристалічної взаємодії.

До третього виду належать метали і їх сплави, які практично не зварюються плавленням, тобто не можуть взаємно розчинятися в рідкому стані. Між ними встановлюється лише дуже слабкий міжкристалічний зв'язок елементів.

## **2 МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВЛЕННЯМ**

Під терміном «металургійні процеси» розуміють високотемпературні явища взаємодії фаз, які супроводжують одержання металу.

Це процеси розплавлення й затвердіння металу, при яких відбувається зміна його хімічного складу й кристалічної будови, перехід з

однієї фази в іншу. Ці процеси можуть бути реакціями переходу, заміщення й розподілу елементів між фазами.

Процеси зварювання плавленням обов'язково містять фазу нагрівання основного й присадного металів до їхнього розплавлення з наступним охолодженням і затвердінням. У зв'язку з цим взаємодія фаз спершу йде в умовах підвищення, а потім зниження температури. Ця взаємодія може бути ендотермічною, що проходить з поглинанням теплоти, або екзотермічною, що супроводжується виділенням теплоти. Підвищення температури підсилює ендотермічні процеси й послабляє екзотермічні. При зниженні температури відбувається протилежний процес.

При сталих умовах (температура, тиск та ін.) реакції взаємодії фаз із часом прагнуть досягти рівноважного стану, при якому швидкості проходження цих реакцій в одному напрямку дорівнюють швидкостям їхнього проходження в протилежному. Рівновага реакцій взаємодії фаз залежить від температури. Через те, що температура в зоні зварювання постійно змінюється, реакції взаємодії фаз можуть змінювати як напрямок свого проходження, так і стан фаз. При цьому рівновага між реагуючими речовинами, як правило, не встигає встановлюватися.

## **2.1 Особливості металургійних процесів при зварюванні плавленням**

Зварювання також є металургійним процесом, але відрізняється від інших подібних процесів такими особливостями:

- відбувається при високій температурі нагрівання;
- здійснюється з великою швидкістю;
- характеризується дуже малими обсягами нагрітого й розплавленого металу;
- при зварюванні тепло швидко відводиться від розплавленого металу зварювальної ванни в прилеглі до неї зони твердого основного металу;
- на розплавлений метал у зоні зварювання інтенсивно впливають гази й шлаки, що його оточують;
- у ряді випадків для утворення металу шва використовується присадний метал, хімічний склад якого може значно відрізнитися від складу основного металу;
- у зварювальній ванні розплавлений метал енергійно безперервно фізично й хімічно взаємодіє з навколишнім середовищем, захисною газовою атмосферою, шлаками, основним металом.

## 2.2 Хімічний склад металу шва

Метал шва в загальному випадку при зварюванні електродом, що плавиться, або застосуванні металевих присадок (дроту, порошку й ін.) утвориться в результаті перемішування у ванні основного і електродного (присадного) металів.

Частку основного металу  $\psi$  у шві, що залежить від виду з'єднання (з обробленням і без нього), типу й режиму зварювання, можна визначити з відношення площі  $F_0$ , зайнятої основним металом у поперечному перетині шва, до всієї його площі  $F_0 + F_{ел}$  (рис. 4).

При ручному дуговому зварюванні покритим електродом частка основного металу у шві становить: 0,15...0,40 – при наплавленні валиків; 0,25...0,50 – при зварюванні корневих швів; 0,25...0,60 – при зварюванні під флюсом.

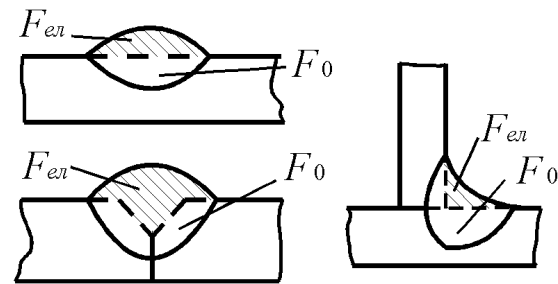


Рисунок 4 – Площі проплавлення  $F_0$  і наплавлення  $F_{ел}$  для різних типів зварних з'єднань

Хімічний склад металу шва і його властивості залежать від складу й частки участі у формуванні шва основного й електродного (присадного) металів, а також реакцій, що відбуваються в процесі зварювання. На хід та інтенсивність цих реакцій впливають, головним чином, навколишнє середовище, ступінь захисту розплавленого металу від повітря, склад навколишніх газів і шлаків, режим зварювання.

За відсутності хімічних реакцій у зоні зварювання кількість будь-якого елемента в металі шва ( $M_w$ ) може бути знайдена за формулою

$$M_w = M_0\psi + M_{ел}(1-\psi),$$

де  $M_0$ ,  $M_{ел}$  – вихідний вміст елемента в основному і електродному металі;  $\psi$  – частка основного металу.

У випадку хімічних реакцій розплавленого металу з газами, покриттями, шлаковою ванною склад металу шва визначають з урахуванням коефіцієнтів переходу, що показують, яка частка металу, що міститься в електродному дроті, переходить в метал шва:

$$M_w = M_0\psi + nM_{ел}(1-\psi),$$

де  $n$  – коефіцієнт переходу, він змінюється в широких межах (0,3...0,95) залежно від хімічної активності елемента, виду зварювання, технології зварювання й ін.

Хімічні реакції взаємодії розплавленого металу з газами при за-

стосуванні певних засобів захисту називають зварювальними металургійними реакціями.

Таблиця 2 – Коефіцієнт переходу деяких елементів при різноманітних засобах зварювання

Вид дугового зварювання	Легуючі елементи			
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>
Зварювання без захисту: дріт марки Св 08А; дріт марки Св 18ХГСА	0,3...0,4 0,29...0,34	0,39...0,56 0,63...0,69	0,5...0,87	0,9...0,95
Зварювання в середовищі CO <sub>2</sub> : дріт марки Св 12Х19Н9Т дріт марки Св 18ХГСА	0,8	0,78 0,8	0,78 0,81	0,94 0,94
Зварювання в середовищі Ar + 5%O <sub>2</sub> : дріт марки Св 18ХГСА дріт марки Св 10ГС	0,6 0,59	0,69 0,41	0,71 0,32	0,92
Зварювання електродами марки УОНИ 13/45		0,45...0,55	0,14...0,27	

Виділяють дві основні зони або стадії взаємодії розплавленого металу з газами й шлаками: торець електрода з краплями, що утворюються на ньому, і зварювальну ванну. Повнота металургійних реакцій залежить від температури, часу взаємодії, стану (площі) й концентрації реагуючих речовин. Характерні умови металургійних реакцій при зварюванні, як і при кристалізації, – висока температура нагрівання, відносно малий обсяг металу, який розплавляють, короткочасність процесу.

Середня температура крапель електродного металу, що надходять у ванну, зростає зі збільшенням щільності струму й становить при зварюванні сталей від 2200 до 2700 °С, тобто характеризується значним перегрівом. Температура зварювальної ванни при дуговому зварюванні також характеризується значним перевищенням температури плавлення, перегрів становить 100...500 °С. Висока температура сприяє значній швидкості реакцій завдяки високій швидкості охолодження.

### **2.3 Характеристика фаз, що утворюють зварювальну систему**

В умовах зварювання плавленням створюється багатокомпонентна гетерогенна система, компонентами якої є метали ( Fe при зварю-

ванні сталей, а також елементи, що вводять для розкиснення, легування й модифікування металу шва), металоїди (C, H, N, O, S, P та інші), хімічні сполуки (оксиди, нітриди, гідриди, сульфідиди, фосфідиди). В умовах зварювання компоненти можуть існувати у твердому, рідкому й газоподібному стані. Відповідно до цього у зварювальній зоні утворюються три основні складні змішані фази: газова, рідка металева й рідка шлакова. При цьому окремі компоненти (як правило, хімічні сполуки) можуть утворювати самостійні прості фази в змішаних конденсованих фазах: металевій і шлаковій.

У зв'язку із цим у металургічній літературі для визначення, в якій фазі знаходиться реагуючий компонент (метал, металоїд, хімічна сполука) і, відповідно, у якій фазі проходить хімічна взаємодія, прийнято такі позначення: якщо речовина існує в металевій фазі, її хімічну формулу беруть у квадратні дужки; якщо – в шлаковій, її хімічну формулу беруть у круглій дужки; якщо – в газовій, її хімічну формулу записують без дужок.

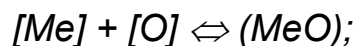
З урахуванням цього хімічні реакції записують таким чином:  
у газовій фазі (метал і його оксид існують у вигляді пари)



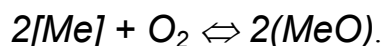
у металевій фазі (кисень й оксид знаходяться у розчині)



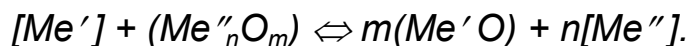
у двофазній системі (оксид утворює самостійну фазу, що не розчиняється в металі, та переходить у шлак)



у трифазній системі



Обмінна реакція між металевою й шлаковою фазами має вигляд



У цьому випадку речовини переходять у металеву або шлакову фазу залежно від розчинності в цих фазах.

Стрілки в рівняннях показують, що взаємодія може йти в обох напрямках. При високих температурах реакції відбуваються переважно зліва направо. При зниженні температури рівновага цих реакцій зміщується зправа наліво.

### 2.3.1 Газова фаза при зварюванні плавленням

Газова фаза складається з простих двоатомних газів:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  і складних газів:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  пара,  $C_nH_m$ , які попадають у зону зварю-

вання безпосередньо або в результаті дисоціації різних органічних і неорганічних речовин і газів, а також різних обмінних реакцій (наприклад, карбідів і парів води). Так, азот попадає в зону зварювання, головним чином, із повітря. Джерелами кисню й водню є повітря, зварювальні матеріали (електродні покриття, флюси, захисні гази та ін.), а також окисли, поверхнева волога й інші забруднення на поверхні основного й присадного металів. Нарешті кисень, водень та азот можуть утримуватися в надмірній кількості в металі, що переплавляють.

Зварювання плавленням характеризується високими температурами (при дуговому зварюванні – 5000...7000 К, при плазмовому – 10000...12000 К). При таких температурах у газовій фазі відбувається багатостадійний процес дисоціації газів (рис. 5).

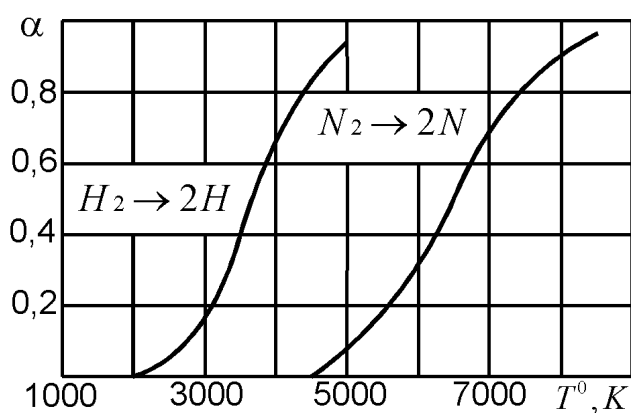


Рисунок 5 – Залежність дисоціації водню і азоту від температури

Дисоціацію простих двоатомних газів – водню, кисню і азоту – можна записати такими рівняннями:



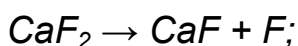
Ці процеси супроводжуються поглинанням тепла, тобто є ендотермічними. Звідси видно, що енергія, яка витрачається на дисоціацію молекули азоту, найбільш висока й тому молекула азо-

ту – сама міцна. В однакових умовах азот має дисоціювати менше, ніж кисень і водень.

Аналогічно відбувається дисоціація триатомних газів, з яких у зварювальних процесах звичайно беруть участь пари води й вуглекислий газ:



Дисоціації підлягають й більш складні з'єднання. До складу багатьох електродних покриттів і флюсів входять плавиковий шпат  $CaF$  і карбонати, наприклад  $CaCO_3$ . При високих температурах вони розкладаються відповідно до реакцій



Двоатомні гази  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ , що утворюються, також дисоціюють.



На склад газової фази впливає також метал, що випаровується, змінюючи цим умови проходження дугового розряду, а також електронного або лазерного випромінювання. Це випарювання є вибірним, причому інтенсивніше випаровуються елементи з більш високою пружністю пари. Наприклад, при зварюванні сталі найбільш інтенсивно випаровується марганець, при зварюванні латуні – цинк. У результаті вибірного випарювання помітно знижується концентрація летких елементів у металі шва, що необхідно враховувати при розробленні технології зварювання.

### 2.3.2 Шлакова фаза при зварюванні плавленням

Шлаки являють собою рідкі мінеральні фази, що відокремлюють дзеркало металу від безпосередньої дії газової фази. Шлаки не ізолюють метал від газової фази, а тільки заміняють безпосередній контакт дифузійним. Вони утворюються при плавленні електродного покриття, флюсу, шихти порошкового дроту або при металургійних процесах, що відбуваються при зварюванні, наприклад, при зварюванні у вуглекислому газі.

Призначення шлаків – одержати бажаний напрямок процесів при зварюванні, а саме:

- захистити розплавлений метал від взаємодії з газовою фазою;
- забезпечити необхідні зварно-технологічні властивості процесу: мінімальне розбризкування, правильне формування шва, стабільне існування дугового розряду, газовиділення з металу шва, легке відділення шлакової кірки від поверхні металу шва, що кристалізувався;
- забезпечити проходження необхідних металургійних процесів у зоні плавлення – розкиснення, легування, рафінування, зв'язування водню в сполуки, що не розчиняються в металі;
- сповільнити охолодження металу шва після зварювання.

За своїм складом шлаки – це складна система з оксидів і (або) нейтральних солей, між якими можуть відбуватися хімічні реакції, що приводять до утворення нових речовин. Головні компоненти зварювальних шлаків можна розбити на чотири групи (табл. 3).

У розплавленому стані основні оксиди взаємодіють із кислотними або амфотерними і утворюють хімічні сполуки – комплексні оксиди, які, як правило, більш рідкоплинні й легкоплавкі.

У цей час існують дві теорії, що описують будову рідких шлаків, – молекулярна й іонна. Відповідно до молекулярної теорії шлаки – це системи вільних і хімічно сполучених неметалевих з'єднань (оксидів та інших), між якими є рухома хімічна рівновага. При цьому з металом взаємодіють тільки вільні компоненти (зокрема, оксиди).

Таблиця 3 – Головні компоненти зварювальних шлаків

Кислотні оксиди	Основні оксиди	Амфотерні оксиди	Нейтральні солі
$Si_2, Ti_2, B_2O_3, P_2O_5, Zr_2$	$Na_2O, K_2O, Ca, Mg, Fe, Mn$	$Al_2O_3, Fe_2O_3, Cr_2O_3, V_2O_3$	$KF, Na, Li, Ca_2, Ba_2, KCl, NaCl, MgCl_2, Na_3Al_6$ (криоліт)

Згідно з іонною теорією шлаки мають будову іонного типу. В рідких шлаках всі оксиди і їхні хімічні сполуки дисоціюють на іони. У розплавлених шлаках існують позитивно заряджені катіони:  $Ca^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Al^{3+}$  та інші й негативно заряджені аніони  $O^{2-}, F^{2-}, S^{2-}, SiO, TiO$  й ін.

Молекулярна теорія шлаків розроблена досить детально. Вона є більш зручною для практичних розрахунків рівноважних систем.

Найважливіші показники зварювальних шлаків – їх здатність об'єднувати оксиди, нітриди, сульфідів, фосфідів в міцні хімічні сполуки, що не розчиняються в металі, і які можуть легко видалятися в шлаки.

Характер протікання металургійних процесів між металом і шлаками залежить від хімічного складу шлаків. Формальну перевагу кислотних або основних характеристик шлаків оцінюють коефіцієнтом основності  $B$  або кислотності  $K$ . Шлаки відносять до кислих при  $B < 1$ , до основних при  $B = 1$ , до нейтральних при  $B > 1$ . Звичайно у зварювальних шлаках  $B = 0,6 \dots 1,3$ , але вже при  $B > 1,1$  погіршуються зварювальні властивості шлаків.

Кислі шлаки добре розкиснюють сталі завдяки зв'язуванню  $Fe$  у комплексні сполуки з  $SiO_2, TiO_2$ . Однак значні швидкості охолодження не дозволяють довести процес до кінця, тому потрібно застосовувати ще й розкиснювачі. Крім того, кислі шлаки не можуть рафінувати метал, тому вихідні матеріали повинні мати мінімальну кількість сірки й фосфору (не більше ніж 0,10 % кожного).

Основні шлаки добре зв'язують сірку й фосфор у комплексні сполуки, що видаляють у шлаки, але вони не можуть зв'язати  $Fe$  у комплекси, тому що це потребує більшої кількості розкиснювачів.

Шлаки повинні мати такі фізичні властивості:

– їх температура плавлення має бути на  $200 \dots 300$  °C нижче температури плавлення металу (див. табл. 1);

– питома вага – менше питомої ваги металу (див. табл. 3);

– в'язкість – на два порядки більше в'язкості металу (так, коефіцієнт в'язкості сталей  $\eta = (1 \dots 2) \cdot 10^{-3}$  Па·с, коефіцієнт в'язкості шлаків  $\eta = (0,8 \dots 3) \cdot 10^{-1}$  Па·с);

– зварювальні шлаки при розплавленні мають різко зменшувати свою в'язкість, тобто вони мають незначний температурний перехід-

ний інтервал;

– шлакова кірка має легко відділятися від поверхні металу, що закристалізувався.

Шлакова кірка легко відділяється за відсутності шпінелей у шлаках. Шпінелі – це комплексні сполуки типу  $MeR_2O_4$ , де елементом  $Me$  є  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Mg$ , а елементом  $R$  –  $Al$ ,  $Cr$ ,  $V$ . Шпінель пристроюють до кристалічної ґратки сталі, тому її важко усувати з поверхні металу шва. Крім того, для ефективного відокремлювання шлаків від металу шва необхідно, щоб коефіцієнти  $\alpha$  лінійного розширення металу й шлаків істотно розрізнялися. Звичайно у сталей  $\alpha \cdot 10^6 = 11,5 \dots 14,0$   $1/^\circ\text{C}$ , у шлаків  $\alpha \cdot 10^8 = 9,9 \dots 11,5$   $1/^\circ\text{C}$ . Найкраще відокремлювання шлаків спостерігається при малому їх окисненні.

Шлаки мають три стани: рідкоплинний ( $\eta \leq 1$  Па·с), в'язкий ( $\eta = 10 \dots 10^2$  Па·с) і крихкий ( $\eta > 10^2$  Па·с).

Ті шлаки, у яких температурний інтервал переходу з в'язкого стану в рідкоплинний є незначним, називають короткими. Довгі шлаки мають значно більший температурний інтервал переходу.

Короткі шлаки мають в'язкість майже постійну в інтервалі температур  $1200 \dots 1400$   $^\circ\text{C}$ . При температурі близько  $1100$   $^\circ\text{C}$  в'язкість коротких шлаків різко підвищується й вони твердіють. Таким чином, короткі шлаки швидко твердіють з боку поверхні, залишаючись рідкими у зоні зіткнення з металом, що кристалізується. Це забезпечує як вільний вихід газів з металу, так і відповідне формування шва. Короткі шлаки є основними.

Довгі шлаки є більш густими, їхня в'язкість повільно знижується в інтервалі  $1000 \dots 1400$   $^\circ\text{C}$ . Такі шлаки поступово переходять спочатку з рідкого стану в густий, потім – у тістоподібний і далі – у твердий.

Температуру на початку твердіння довгих шлаків важко встановити. Перехід з тістоподібного стану в твердий в довгих шлаках супроводжується наростанням в'язкості, при якій перегрупування часток, необхідне для одержання кристалічної ґратки, утруднюється. Тому довгі шлаки не кристалізуються, а переходять у склоподібну масу.

Довгі шлаки – це звичайно кислі силікатні шлаки. Чим більший вміст  $SiO_2$  у шлаку, тим вище його в'язкість. Довгі густі повільнотверднучі шлаки є менш активними стосовно металу й відрізняються нижчими формуючими властивостями.

Від в'язкості шлаків залежить газопроникність металу, тобто його здатність пропускати газу, що з нього виділяються. Швидкість виділення газів з металу залежить від їхнього тиску над поверхнею металу. Якщо газопроникність шлаків є низькою, то на поверхні металу створюється підвищений тиск газів, що перешкоджає їхньому подальшому виділенню. У цьому випадку у шві може утворитися пористість, а

на поверхні шва – дрібні тріщини та інші дефекти.

Густі шлаки мають низьку газопроникність, а малов'язкі рухливі шлаки – високу. У рідкоплинних шлаках швидке виділення газів з металу супроводжується попутним «захопленням» часток шлакових включень і більш повним очищенням металу шва. Тому важливо правильно підбирати відповідні добавки до шлаків, щоб впливати на їхню в'язкість у потрібній мірі.

Кращим розріджувачем шлаків, особливо основних, є фтористий кальцій  $\text{CaF}_2$  (плавиковий шпат). В'язкість зменшують також хлориди, оксиди ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ). Особливо сприятливо впливає на одержання коротких шлаків  $\text{TiO}_2$ . Збільшують в'язкість  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ .

При зварюванні найчастіше використовують малов'язкі легкорухливі швидкотверднучі шлаки. Цій умові найбільше задовольняють короткі основні шлаки.

Головні шлакові системи за складом компонентів поділяють на три типи: оксидні (силікати і основні), оксидно-сольові й сольові. Силікати застосовують для зварювання маловуглецевих і низьколегованих сталей, основні шлакові системи – для зварювання нержавіючих високолегованих сталей. Оксидно-сольові шлаки використовують для зварювання середньо- й високолегованих сталей і для наплавлення, сольові – для зварювання алюмінієвих і титанових сплавів.

За своєю будовою шлаки повинні мати не більше трьох головних компонентів (див. табл. 1.) Наприклад, кислі електродні покриття побудовано на основі  $\text{Si}_2\text{-FeO-MnO}$ , основні – на базі  $\text{CaO-SiO}_2\text{-CaF}_2$ , плавлені флюси для зварювання маловуглецевих сталей – на основі  $\text{Si}_2\text{-MnO- CaF}_2$ .

За вмістом двоокису кремнію  $\text{SiO}_2$  і закису марганцю  $\text{MnO}$  оксидні флюси (шлаки) поділяють на кілька категорій:

за вмістом  $\text{Si}_2$ :

- безкремністі ( $\text{SiO}_2$  у вигляді домішок не більше 5 %);
- низькокремністі ( $\text{SiO}_2 = 6 \dots 35$  %);
- висококремністі ( $\text{SiO}_2 > 35$  %);

за вмістом  $\text{MnO}$ :

- безмарганцеві ( $\text{MnO}$  у вигляді домішок не більше 1 %);
- низькомарганцеві ( $\text{MnO}$  до 10 %);
- середньомарганцеві ( $\text{MnO} = 15 \dots 30$  %);
- високомарганцеві ( $\text{MnO} = 30$  %).

Залежно від коефіцієнта активності  $A_\phi$  флюси можна класифікувати за чотирма групами:

- високоактивні ( $A_\phi > 0,6$ );
- активні ( $A_\phi = 0,6 \dots 0,3$ );

- малоактивні ( $A_{\phi} = 0,3 \dots 0,1$ );
- пасивні ( $A_{\phi} < 0,1$ ).

Коефіцієнт відносної хімічної активності флюсу досить повно характеризує окисну здатність флюсів. Окиснювання металу шлаками відбувається в результаті окиснювально-відновних процесів на поверхні розподілу фаз шлак-метал. Окиснювання металу приводить до зниження його пластичних властивостей, насамперед ударної в'язкості.

Активні флюси використовують для зварювання сталей з межею міцності  $\sigma_B \leq 600$  МПа. Застосування їх при зварюванні низьколегованих теплотривких сталей і сталей підвищеної й високої міцності призводить до забруднення металу швів неметалічними вкрапленнями, сіркою й фосфором, можливе також утворення кристалізаційних тріщин у металі швів, зниження стійкості швів до переходу в крихкий стан. Для зварювання низьколегованих сталей рекомендують застосовувати малоактивні флюси, а для середньо- й високолегованих сталей – малоактивні й пасивні флюси.

Найбільш інтенсивно взаємодіють фази при газовому і електро-дуговому зварюванні, коли знаходження металу в рідкому стані є відносно тривалим. Внаслідок великої концентрації енергії й малої площі плями нагрівання при електронно-променевому й імпульсному лазерному зварюванні тривалість перебування металу в рідкому стані є незначною. Швидкості плавлення, охолодження й затвердіння металу є високими, що утрудняє взаємодію фаз. При електрошлаковому зварюванні газова атмосфера з металом зварювальної ванни безпосередньо не контактує, внаслідок чого основною є лише взаємодія металу зі шлаками.

Процеси взаємодії фаз у зоні зварювання відбуваються одночасно, однак, для зручності опису спочатку розглянемо взаємодію металу з газовою фазою, а потім – зі шлаками.

## **2.4 Взаємодія металу з газовою фазою**

### **2.4.1 Розчинення газів у рідкому металі**

Дисоціація двоатомних газів до атомарного стану в умовах зварювання дуже важлива, тому що внаслідок дисоціації підвищується активність газів і вони при взаємодії з розплавленим металом у вигляді крапель і зварювальної ванни можуть у ньому розчинитися або ж утворювати з ним хімічні сполуки (табл. 4.)

Якщо при дисоціації відбувається розчинення газу в металі, то сумарний тепловий ефект, як правило, є позитивним ( $\Delta H > 0$ ), тобто такий процес – ендотермічний.

Таблиця 4 – Розчинність водню, азоту й кисню в рідких металах

Характер взаємодії	Розчинність	H	N	O
Не утворюються сполуки (ендотермічна розчинність)	Газ розчиняється в металі	<i>Ag, Al, Be, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, Ru, Sn, W, Zn</i>	-	<i>Ag</i>
	Газ не розчиняється в металі	<i>Au, Hg</i>	<i>Pb, Cr, Cu, Ag, Au, Zn, метали платинової групи</i>	<i>Au, метали платинової групи</i>
Утворюються сполуки (екзотермічна розчинність)	Сполуки добре розчиняються в металі	Рідкісноземельні метали: <i>Sc, Y, Ti, Zr, Hf, Th, V, Nb, Ta, U</i>	<i>Ti, Zr, Hf, Th, V, Nb, Ta, U</i>	<i>Ti, Zr, Hf, Th, V, Nb, Ta,</i>
	Сполуки середньо розчиняються в металі	<i>Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba</i>	<i>Co, Cr, Fe, Mn, Mo, W</i>	<i>Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, W</i>
	Сполуки не розчиняються в металі	-	<i>Li, Na, K, Ba, Mg, Ca, Zn, Al</i>	<i>Al, Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Cd</i>

Відповідно до принципу Ле-Шательє розчинність газу в металі буде зростати з підвищенням температури й зменшуватися при її зниженні .

Якщо ж газ утворює з металом хімічну сполуку, то сумарний тепловий ефект термодинамічного процесу в цьому випадку може бути негативним ( $\Delta H < 0$ ), тобто процес буде екзотермічним. Тут підвищення температури викликає зменшення розчинності, а зниження – її зростання.

Насичення розплавленого металу газами відбувається як у краплях, так і у зварювальній ванні. У ванні ці процеси здійснюються менш інтенсивно, ніж у краплях за двома причинами:

– температура ванни нижче температури крапель;

– у ванні відношення площі поверхні реакції до об'єму значно менше, ніж у крапель.

При цьому, якщо газ знаходиться в атомарному стані, то його розчинність у металі безпосередньо відповідає закону Генрі (є пропорційною тиску газу), а розчинність двоатомних газів, що існують у молекулярному стані, підпорядковується закону Сивертса (є пропорційною кореню квадратному з величини тиску газу).

Зі збільшенням температури металу підвищується розчинність в ньому газу, причому в краплях ця розчинність може досягати значної величини. Однак при температурах, близьких до температури кипіння металу, розчинність газу помітно зменшується і у момент кипіння дорівнює нулю.

Механізм розчинення газів у рідкому металі складається з окремих стадій, що відбуваються послідовно:

- адсорбція атомів газу поверхнею металу;
- взаємодія адсорбованого газу в поверхневому шарі з металом – утворення розчинів і хімічних сполук (звичайно ці процеси називають хемосорбцією);
- відвід продуктів хемосорбції вглиб рідкого металу.

Процеси адсорбції й хемосорбції відбуваються із дуже високими швидкостями, практично миттєво. Швидкості відводу продуктів хемосорбції вглиб металу є меншими. У відводі продуктів хемосорбції вглиб металу значну роль відіграє механічне перемішування рідкого металу, що здійснюється часто з бурхливим виділенням газів.

Розглянута схема розчинення газів у металі одержала назву «хімічного поглинання газів металом».

За наявності електричного поля є можливим й електричне поглинання газів металом. Воно спостерігається тільки на поверхні катода, в області активної плями, куди спрямовуються позитивні іони газів, що надходять зі стовпа дуги. Наявність у поверхні катода шару позитивних іонів підвищеної концентрації приводить до їхнього переміщення в об'єм металу дифузійним шляхом внаслідок різниці концентрацій.

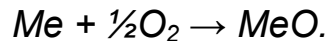
Ступінь розвитку електричного поглинання газів металом залежить від величини катодного спадання напруги, складу газового середовища, величини струму й ін.

#### **2.4.2 Окиснювання металу при зварюванні**

Можливими є такі три основних види окиснювання складових металу й шлаків:

- пряме окиснювання;
- окиснювання нижчих оксидів до вищих;
- окиснювання на основі обмінних реакцій.

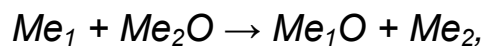
Пряме окиснювання в загальному вигляді може бути описано реакцією



Тут відбувається безпосереднє окиснювання елемента вільним киснем з утворенням відповідного оксиду.

Такі процеси за рідкісним винятком супроводжуються виділенням тепла, тобто вони є екзотермічними (див. табл. 3, 4) і при високих температурах відбуваються повільно. На поверхні ж відкритої зварювальної ванни інтенсивність прямих окисних реакцій є значно вищою, чому сприяє їхній екзотермічний характер.

Окиснення на основі обмінних реакцій описують у загальному вигляді таким рівнянням:



де  $Me_1$  і  $Me_2$  – різні метали.

На напрямок реакції крім зовнішніх умов істотно будуть впливати концентрація реагуючих речовин і спорідненість елементів з киснем.

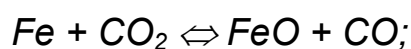
Залізо з киснем утворює три оксиди:



Із цих трьох оксидів тільки закис заліза розчиняється в залізі (розчинність залежить від вмісту вуглецю в сталі та її температури) й тому найбільше впливає на його властивості. Концентрація розчиненого закису заліза в розплавленому чистому залізі при високих температурах може досягати до 0,5%. Цей оксид має температуру плавлення меншу, ніж основний метал. Тому при кристалізації металу шва він твердіє в останню чергу. При високих швидкостях охолодження зварного шва частина оксидів  $Fe$  залишається в розчині, утворюючи шлакові прошарки між зернами металу, підвищуючи при цьому поріг холодноламкості, тобто температуру, при якій метал втрачає пластичність. Для швів з підвищеним вмістом  $Fe$  цей поріг становить  $-10 \dots 5$  °С.

Вищі оксиди в залізі не розчиняються і, якщо вони не встигають спливати на поверхню зварювальної ванни, залишаються в металі шва у вигляді шлакових **вкраплень**, які легко розкладаються при високих температурах.

Залізо може окиснитися за рахунок кисню, що міститься в  $CO_2$  та парах води  $H_2O$  :



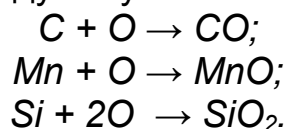


Таблиця 5 – Тепловий ефект прямого окиснення елементів

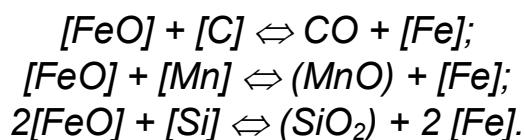
Реакції	Тепловий ефект	
	На 1г/моль ок-сиду	На 1г/моль кисню
$\text{Ca} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CaO}$	+151,7	+303,4
$\text{Mg} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{MgO}$	+146,1	+292,2
$2\text{Al} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	+393,3	+262,2
$\text{Ti} + \text{O}_2 \rightarrow \text{TiO}_2$	+219,0	+219,0
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	+206,0	+206,0
$2\text{Na} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$	+100,7	+201,4
$2\text{Cr} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$	+270,6	+180,4
$2\text{P} + \frac{5}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$	+369,1	+147,9
$\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{Fe};$ $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{MnO} + \text{Fe};$ $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}.$	+266,5	+133,2
$2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ (закис, 22% $\text{O}_2$ ); $6\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4$ (закис, 27,6% $\text{O}_2$ ); $4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (закис, 29,7% $\text{O}_2$ )	+64,5	+129,0
$\text{Ni} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$	+59,0	+118,0
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (пар)	+57,8	+115,6
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	+94,2	+94,2
$2\text{Cu} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{O}$	+41,0	+82,0
$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	+26,4	+52,8
$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	+69,3	+59,3
$\frac{1}{2}\text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}$	+21,6	-43,2

Наявність легуючих елементів у сталі впливає на розчинність кисню. Найбільш ефективно знижують розчинність кисню в залізі вуглець і кремній.

Наявність кисню в сталях разом з окиснюванням заліза викликає безпосереднє окиснювання ряду легуючих елементів, наприклад:



Крім того, паралельно можуть відбуватися реакції взаємодії легуючих елементів із закисом заліза, наприклад:



Окиснення цих елементів призводить до зменшення їхнього вмісту в металі шва. Крім того оксиди, які утворюються, можуть залишатися у шві у вигляді різних вкраплень, що значно знижує механічні властивості зварних з'єднань, особливо пластичність й ударну в'язкість металу шва.

Поряд із цим при збільшенні вмісту кисню в сталі відбуваються такі процеси:

- зменшується її стійкість проти корозії;
- виявляється схильність до старіння;
- при вмісті кисню більше 0,08% з'являється схильність до холодно- і червоноламокості;
- прискорюється зростання зерен в структурі сталі при нагріванні;
- погіршується оброблюваність різанням і куванням;
- знижується магнітна проникність і збільшується електричний опір.

### 2.4.3 Взаємодія металу з азотом

Азот у зоні зварювання знаходиться як у молекулярному, так і в атомарному стані. Атомарний азот більш активно розчиняється в розплавленому металі зварювальної ванни, ніж молекулярний. Він розчиняється в більшості конструкційних матеріалів і з багатьма елементами утворює з'єднання, які називають нітридами.

Із залізом азот утворює два типи нітридів:



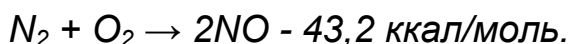
З легуючими елементами сталі азот також утворює нітриди, часто значно більш стійкі, ніж нітриди заліза. Особливо стійкими в області високих температур є нітриди кремнію  $SiN$  і титану  $TiN$ .

Можливі такі шляхи насичення металу азотом:

– азот, що дисоціював, безпосередньо розчиняється в рідкому металі крапель. При наступному охолодженні металу в умовах відповідних температур утворюються нітриди заліза;

– азот, що дисоціював, утворює в області високих температур стійкі нітриди, які, розчиняючись у краплях рідкого металу, насичують його азотом. У цьому випадку в міру охолодження металу зварювальної ванни з розчину може виділитися атомарний азот, що, вступаючи у взаємодію із залізом, утворює при відповідних температурах нітриди заліза;

– азот, що дисоціював, утворює у високотемпературній області окис азоту  $NO$ , що розчиняється в краплях:



При температурах металу нижче  $1000^\circ C$  окис азоту випадає з твердого розчину й дисоціює; при цьому атомарний азот утворює нітриди заліза, а кисень – оксиди.

На ступінь насичення металу шва азотом впливають режими зварювання і охолодження. Повільне охолодження сприяє видаленню зі шва газоподібного азоту. При великих швидкостях охолодження азот не встигає повністю виділитися і утворює з металом перенасичений твердий розчин. Такий азот згодом стає причиною старіння металу шва й зниження його механічних властивостей.

Знаходячись у металі в тому або іншому стані, азот значно впливає на його властивості. З підвищенням вмісту азоту збільшуються межі міцності й плинності металу, знижуються пластичні властивості й особливо різко — ударна в'язкість сталі (рис. 6). Поряд із цим з'являється схильність металу до старіння, підвищується схильність до холодноламкості й синьоламкості, зростає здатність до загартування, знижується магнітна проникність, збільшується електричний опір металу.

У загальному випадку азот – небажана домішка в металі шва. Однак в умовах зварювання високолегованих сталей аустенітного класу азот підвищує стійкість аустеніту та відіграє роль легуючої добавки, здатної замінити деяку кількість нікелю.

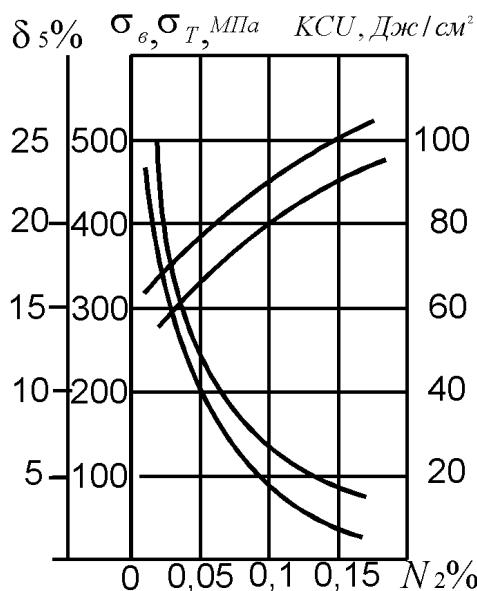


Рисунок 6 – Вплив азоту на механічні властивості сталі

#### 2.4.4 Взаємодія металу з воднем

Водень розчиняється в більшості металів. Метали, здатні розчиняти водень, можна поділити на дві групи. До першої групи належать метали, що не мають хімічних сполук з воднем (залізо, нікель, алюміній, кобальт, мідь та ін.), до другої – метали (титан, цирконій, ванадій, ніобій, тантал, паладій, рідкоземельні елементи й ін.), що утворюють із воднем хімічні сполуки, які називаються гідридами.

Водень у зоні зварювання утворюється під час дисоціації водяно-

го пару при високій температурі дуги. Водяний пар надходить у зону зварювання з атмосферної вологи, а також з вологи, що затримується в покритті електродів, флюсів, іржі на крайках заготовок та ін.

Молекулярний водень при дуговому зварюванні розпадається на атомарний, котрий добре розчиняється як у твердому, так і в розплавленому металі. Розчинність водню в залізі з підвищенням температури нагрівання збільшується, досягаючи максимальної величини при температурі 2400 °С. Найбільш значне насичення металу воднем відбувається під час переносу краплі. Ступінь насичення рідкого металу воднем залежить від наявності в газовому середовищі елементів, здатних зв'язувати водень у хімічні сполуки, що не розчинюються в рідкому металі, й тим самим знижувати його парціальний тиск у газовому середовищі:



Окисненість рідкого металу знижує вміст у ньому водню.

Потрапляючи в рідкий метал в атомарному стані, атоми водню дифундують за всім об'ємом рідкого металу й можуть затримуватися в окремих місцях (наприклад, між гілками дендритів), з'єднуються там у молекули і утворюють міхур, у який продовжують дифундувати атоми водню. Молекулярний водень не розчиняється в сталі. Скупченість водню викликає підвищення тиску й збільшення обсягу міхура, тому в період кристалізації ванни він виділяється зі шва.

Такі міхури, переборюючи дію маси рідкого металу й сил поверхневого натягу, частково видаляються зі зварювальної ванни, але як тільки метал закристалізується, молекулярний водень із металу виділитися не зможе. Якщо такі міхури не встигають виділитися з металу, вони утворюють у ньому газові пори й раковини. Крім того, оскільки атомарний водень дифундує в порожнинах, заповнених газом, то й після затвердіння металу шва, він з'єднується там у молекули, залишається в цих порожнинах і викликає підвищення тиску молекулярного водню. У результаті в металі створюється напружений стан, що може сприяти виникненню мікроскопічних тріщин, так званих флокенів.

Крім того, водень може окиснитися у водяну пару, що не розчиняється у металі.

Отже, хоча водень і не утворює з металом шва сполук, що негативно впливають на міцність цього металу, він підсилює шкідливий вплив макро- й мікронесуцільностей, сприяє різкому зниженню пластичних властивостей металу й призводить до його крихкого руйнування.

Для зменшення вмісту водню у звареному шві користуються рядом практичних прийомів:

- електроди й флюси перед зварюванням ретельно прожарюють;
- крайки заготовок, що зварюють, і зварювальний дріт очищають від вологи, бруду та іржі;
- шви виконують із мінімальним числом проходів, тому що при накладенні наступного шва попередній шов у момент вторинного розплавлення насичується воднем;
- при виконанні зварювальних робіт на відкритій площадці забезпечують захист зони зварювання від атмосферних опадів;
- зварювання відповідальних конструкцій виконують тільки при температурах вище 0 °С.

Про ступінь захисту зони плавлення від повітря і якість видалення продуктів реакції при різних способах зварювання свідчать дані, наведені в табл. 6.

## **2.5 Взаємодія металу зі шлаковою фазою**

Тривалість взаємодії рідких шлаків і металу при зварюванні плавленням звичайно є невеликою. При дуговому зварюванні вона може коливатися від 10 с до 1 хв, а при електрошлаковому зварюванні досягати декількох хвилин. Ця взаємодія припиняється після затвердіння металу й шлаків.

Незважаючи на відносну короткочасність, реакції взаємодії шлаків і металу при електродуговому зварюванні можуть відбуватися досить енергійно, що обумовлено високими температурами нагрівання металу й шлаків, більшими поверхнями їхнього контактування й порівняно більшою відносною кількістю шлаків. Кількість шлаків в середньому становить 30-40% маси металу зварювальної ванни при зварюванні під флюсом і до 10% – при зварюванні за флюсом. Приблизно така ж кількість шлаків утворюється й при ручному дуговому зварюванні якісними електродами. У зв'язку з досить невеликою витратою флюсу при електрошлаковому зварюванні метал і шлаки взаємодіють слабкіше, ніж при дуговому.

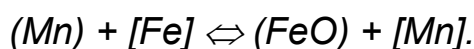
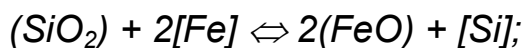
Взаємодію металу зі шлаками слід розглядати як гетерогенні окисно-відновні процеси між компонентами шлаків і металу на межі розподілу метал - шлаки, а також як екстракцію (добування з металу небажаних домішок – оксидів, фосфідів, сульфідів та інших), основу на законі розподілу.

Реакції взаємодії рідких шлаків і металів є або реакціями заміщення, тобто витиснення зі шлаків у метал одного елемента іншим, або реакціями розподілу елемента між металом і шлаками.

Таблиця 6 – Вміст газів, см<sup>3</sup>/100 г, у металі при дуговому зварюванні

№ п/п	Спосіб зварювання	Загальна кількість газів	У тому числі			
			Кисень	Азот	Водень	
					Дифузійний	Остаточний
1	СОДГП	155	50	90	2,5	1,25
2	Під флюсом АН-48А	132,5	112	14,5	2,5	3,5
3	Електродами з кислим покриттям	107,5	72,5	21	9	5
4	Електродами з рутиловим покриттям	70...110	42...84	24...32	28...44	12...16
5	Електродами із целюлозним покриттям	70...110	2...70	16...24	25...50	14...25
6	Електродами з основним покриттям	50...70	13...18	32...40	2...4	3...5
7	У СО <sub>2</sub> , дрот Св-8М2С Ø 1,0 мм на мінімальних режимах	60	40	16	1,5	2,5
8	У СО <sub>2</sub> , дрот Св-8М2С Ø 1,6 мм на максимальних режимах	95	65,5	20	3	5,6
9	ПП-АН-3 самозахисним дротом	95	63	24,5	3	5,6
10	ПП-АН-4 у СО <sub>2</sub>	51	35	9,5	2,5	4

Наприклад, реакції відновлення кремнію й марганцю зі шлаків залізом (реакції заміщення) мають такий вигляд:



Реакції розподілу записують так:



Сірка розподіляється між шлаками й металом переходом через міжфазну межу молекул сульфідів заліза. Такий розподіл сірки спостерігається при взаємодії кислих шлаків з рідкою сталлю.

Таким чином, металургійні процеси дозволяють регулювати й забезпечувати сталість хімічного складу металу шва й стабільність якості зварного з'єднання.

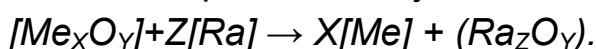
Стрілки в наведених вище рівняннях показують, що взаємодія може йти в обох напрямках. При високих температурах реакції відбуваються переважно зліва направо (відновлення кремнію й марганцю зі шлаків). При зниженні температури рівновага цих реакцій зміщується справа наліво, тобто марганець і кремній окиснюються й переходять з металів у шлаки.

### 2.5.1 Розкиснення металу при зварюванні

Розкисненням називають процес відновлення елемента з його оксиду й переведення кисню у форму нерозчинних з'єднань з подальшим видаленням їх у шлаки. Окиснення й розкиснення являють собою два напрямки того ж самого хімічного процесу.

Розкиснення металу може йти двома шляхами – хімічним (осадочне розкиснення) й фізичним (дифузійне).

При хімічному розкисненні реакція відбувається за схемою



Продукти розкиснення ( $Ra_zO_y$ ) – це продукти, які не розчиняються в металі (вони випадають в осад, тому й процес називають осадочним розкисненням), а розчиняються в шлаку (табл. 7).

Таблиця 7 – Найбільш типові реакції розкиснення

Реакція	Тепловий ефект, кал.
$3[FeO] + 2[Al] \rightarrow (Al_2O_3) + 3[Fe]$	+187300
$2[FeO] + [Si] \rightarrow (SiO_2) + 2[Fe]$	+62994
$2[FeO] + [Ti] \rightarrow (TiO_2) + 2[Fe]$	
$[FeO] + [Mn] \rightarrow (MnO) + [Fe]$	+24047
$3[FeO] + 2 [Cr] \rightarrow (Cr_2O_3) + 3[Fe]$	

Розкиснювачі мають бути спорідненими з киснем більше ніж елемент, який розкиснюють. Окисел розкиснювача має бути конденсованим, не розчинним у металі, а розчинним у шлаку. Температура плавлення окисла має бути нижчою температури плавлення металу, що розкиснюють, а питома вага – меншою питомої ваги металу (табл. 8). Розкиснювачі вводять у зварювальну ванну через електродний

дріт, легуючи його, а покриття електродів або флюс – із використанням відповідних феросплавів.

Таблиця 8 – Температура плавлення й питома вага деяких оксидів і сполук

Оксид або сполука	$T_{пл}, ^\circ C$	$\gamma, г/см^3$
<i>FeO</i>	1370	5,9
<i>MnO</i>	1600	4,7
<i>SiO<sub>2</sub></i>	1710	2,5
<i>TiO<sub>2</sub></i>	1850	4,2
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	2050	3,9
<i>CaO</i>	2570	3,4
<i>2FeO·SiO<sub>2</sub></i>	1320	4,3
<i>MnO·SiO<sub>2</sub></i>	1285	3,6
<i>2MnO·SiO<sub>2</sub></i>	1365	4,1
<i>FeS</i>	1193	4,6
<i>MnS</i>	1620	4,0

Звичайно для хімічного розкиснення застосовують не менше двох розкиснювачів.

Жоден розкиснювач не може повністю видалити кисень, тому що реакція завжди продовжується до рівноважного стану. За наявності двох розкиснювачів у передній частині зварювальної ванни діє більш сильний, у хвостовій – менш сильний. За наявності тільки одного розкиснювача в міру його згоряння у хвостовій частині зварювальної ванни підсилюється реакція вигорання вуглецю, що може призвести до пористості металу шва. Застосовувані розкиснювачі утворюють різні оксиди (кислотні й основні або основні й амфотерні). Взаємодіючи, вони утворюють комплексні з'єднання, що легко розчиняються в шлаку. В цьому випадку вдається вивести в шлакову фазу більшу частину ендогенних продуктів реакції розкиснення.

Для хімічного розкиснення сталей вуглець звичайно не використовують, тому що він:

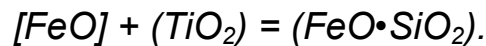
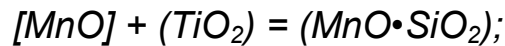
- призводить до пористості металу шва;
- сприяє утворенню як холодних, так і гарячих тріщин, якщо його вміст в сталях становить більше 0,2 %;
- збільшує радіаційну крихкість металу;
- підвищує схильність нержавіючих сталей до міжкристалічної корозії;
- підвищує поріг холодноламкості на 20  $^\circ C$ , якщо його вміст в сталях збільшується на 0,1 %;



– сприяє крупнокрапельному переносу електродного металу.

Алюміній як розкиснювач застосовують нечасто, тому що він утворює тугоплавкі оксиди й сприяє появі тріщин у сталі.

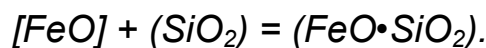
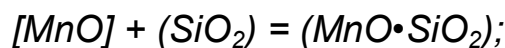
Титан – енергійний розкиснювач, тому при його застосуванні утворюються легкоплавкі титанати марганцю й заліза:



Крім того, титан утворює нітриди, знижуючи вміст азоту в металі, тому його широко застосовують в різних електродних покриттях.

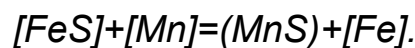
Кремній – дуже гарний розкиснювач, його використовують в електродних покриттях і флюсах у вигляді феросиліцію або кварцового піску.

Оксид кремнію погано розчиняється у залізі й переходить в шлаки. Розкиснення кремнієм супроводжується реакціями утворення більш легкоплавких комплексних силікатів марганцю, кремнію й заліза, які ефективніше переходять у шлаки:



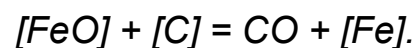
Марганець є найпоширенішим активним розкиснювачем. Він входить у багато які електродні покриття й флюси. Оксид марганцю є малорозчинним у залізі, але сам добре розчиняє оксид заліза FeO, забираючи/переносячи його за собою в шлаки.

Марганець також сприяє видаленню сірки зі сталі:



Сірчистий марганець не розчиняється в сталі й виходить у шлаки.

Вуглець утворює з киснем газоподібний оксид вуглецю, що у сталі не розчиняється, а виділяється у вигляді пухирців. При більших швидкостях охолодження оксид вуглецю не встигає виділитися з металів шва і утворює в ньому газові пори. Розкиснення відбувається таким чином:



Для попередження пористості металу шва рекомендують вводити у зварювальну ванну кремній у такій кількості, щоб припинити розкиснену дію вуглецю.

Дифузійне (фізичне) розкиснення ґрунтоване на утворенні комплексних оксидів на поверхні поділу фаз шлак-метал. Комплексні з'єднання, що утворилися, переходять у шлакову фазу.

Шляхом оброблення розплавленого металу зварювальної ванни шлаками здійснюють дифузійне розкиснення, що ґрунтується на законі розподілу. За цим законом оксид заліза ( $FeO$ ), що розчиняється у металі й шлаках, перерозподіляється між ними до встановлення певного співвідношення:

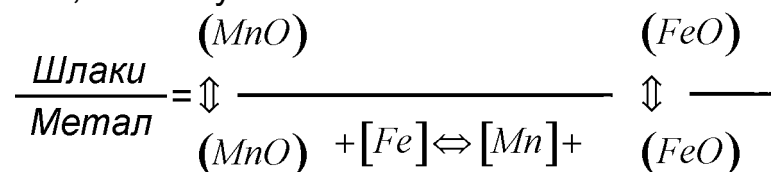
$$L_{FeO} = (FeO) / [FeO] = f(T),$$

де  $L_{FeO}$  – константа розподілу;  $(FeO)$  – концентрація оксиду в шлаку;  $[FeO]$  – концентрація оксиду в металі.

Оскільки  $L_{FeO}$  при певній температурі – величина стала, процес розкиснення теоретично може тривати доти, доки не буде одержана константа розподілу. На практиці в умовах зварювання ця умова не виконується.

Значення  $L_{FeO}$  залежить не тільки від температури, але й від складу шлаків і визначається експериментально. Для зварювальних шлаків  $L_{FeO}$  має бути більше одиниці, тобто шлак має розчиняти  $FeO$  краще, ніж метал.

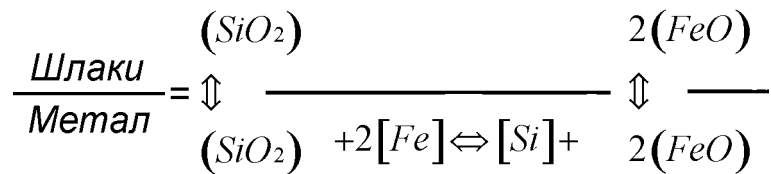
Міжфазна взаємодія, що характеризує розподіл марганцю між шлаками й металом, може бути такою:



У високотемпературній зоні (крапля металу на електроді, що плавиться, проходить через стовп дугового розряду й покривається плівкою шлаків; температура передньої частини зварювальної ванни –  $T \geq 2300$  K) марганець відновлюється, окиснюючи залізо. Далі відновлений марганець розчиняється в залізі, а оксид заліза, що утворився, прямує в шлаки. З підвищенням температури кількість марганцю у металі зростає, тому що реакція його відновлення – ендотермічна. При цьому у випадку використання основних шлаків марганцю є у два-три рази більше, ніж при використанні кислих шлаків.

У низькотемпературній зоні (частина зварювальної ванни, що закристалізувалася,  $T \sim 2000$  K) марганець, що перейшов зі шлаків у метал, знову окиснюється, діючи як розкиснювач і перетворюючи при цьому сірку в сульфід марганцю ( $MnS$ ), який кристалізується при більш високій температурі (1803 K), ніж метал зварювальної ванни.

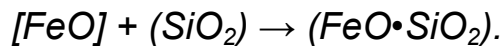
Міжфазна взаємодія на межі метал-шлаки, що визначає розподіл кремнію, відбувається аналогічно розглянутому вище й може бути описана таким чином:



Кількість кремнію при переході зі шлаків у метал збільшується із зростанням вмісту  $SiO_2$  у складі шлаків (кислі шлаки) й зменшується при нагромадженні в шлаку  $FeO$  (окиснені шлаки). З підвищенням температури кількість кремнію, як і марганцю, у металі збільшується. Кремній, що перейшов у метал у високотемпературній зоні, у низькотемпературній зоні, так само як і марганець, буде окиснюватися, відновлюючи залізо і утворюючи шлакові вкраплення  $SiO_2$ . Залишаючись у металі шва, ці вкраплення впливають на його пластичність.

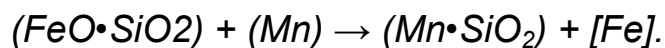
Для видалення  $FeO$  зі сталей необхідно мати в шлаку вільні кислотні оксиди –  $SiO_2$  або  $TiO_2$ .

Реакція відбувається таким чином:



Дифузійне розкиснення здійснюється повільно. Зі збільшенням  $SiO_2$  шлак стає густим довгим малорухливим. Для збільшення його хімічної активності підвищують вміст у ньому  $CaF_2$  або заміняють частину  $SiO_2$  на  $TiO_2$ . За своїми властивостями  $SiO_2$  і  $TiO_2$  – сильні кислотні оксиди, але якщо  $SiO_2$  збільшує в'язкість шлаків, то  $TiO_2$  її зменшує. Крім того, заміна  $SiO_2$  на  $TiO_2$  поліпшує санітарно-гігієнічні умови праці, тому що  $SiF_4$ , що утворюється при виготовленні флюсу, у процесі зварювання існує в газоподібному стані до температури –  $95^\circ C$ , а  $TiF_4$  – тільки до  $+290^\circ C$ . Отже, у зоні дихання зварника  $TiF_4$  буде відсутнім.

Для підвищення хімічної активності шлак можна ще розкисняти, наприклад, так:



Дифузійне розкиснення в процесі зварювання не відіграє великої ролі, воно супроводжує хімічне розкиснення, сприяючи більшому видаленню продуктів розкиснення зі зварювальної ванни.

**Розкиснення кольорових металів**, як і сталей, здійснюється хімічним і дифузійним шляхами.

При зварюванні мідних сплавів можна використовувати ті ж розкиснювачі, що й при зварюванні сталей, тому що спорідненість міді й кисню менша, ніж заліза й кисню. Однак коефіцієнт теплопровідності міді майже в 10 разів більше, ніж у низьковуглецевих сталей, тому й швидкість охолодження є більшою, а час існування зварювальної ванни відповідно є меншим. Отже, для кращого розкиснення треба застосовувати більш сильні розкиснювачі.

Дифузійне розкиснення здійснюється внаслідок використання у флюсах борної кислоти  $H_3B_3$  або бури  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ . У цьому випадку утворюються борати  $Zn \cdot B_2O_3$ ,  $Cu_2O \cdot B_2O_3$ ,  $Mn \cdot 2B_2O_3$ , що видаляються у шлакову фазу.

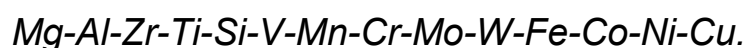
Нікелеві сплави використовують головним чином у хімічній промисловості. Тому в металі шва не має бути шлакових вкраплень. Нікель має високу чутливість до домішок (насамперед до вуглецю й сірки) та розчинених газів. У цей час основним способом зварювання нікелю та його сплавів є зварювання в середовищі аргону. При цьому застосовують комплексне легування титаном, алюмінієм, кремнієм, марганцем (1,5 %), магнієм (0,1 %) шляхом використання відповідного дроту. Також застосовують комплексне легування алюмінієм (до 1%), цирконієм (до 1%), ренієм (до 0,2 %), рідкісноземельними металами (ітрієм, гадолінієм, гафнієм).

Алюміній і його сплави розкиснюють розчиненням алюмінієвої плівки у флюсі. Кріоліт  $Na_3AlF_6$ , що входить у флюс, при температурі  $1000^\circ C$  (середня температура зварювальної ванни при дуговому зварюванні алюмінію) розчиняє  $Al_2O_3$  до 20 % від своєї ваги. Фтористі й хлористі солі, що входять до складу флюсів, приводять до утворення  $HCl$  і  $HF$ , які переводять  $Al_2O_3$  у летучу сполуку. Крім того, при взаємодії  $Al_2O_3$  із фтористими солями утворюється оксид фториду алюмінію змінного складу  $Al_xO_yF_z$ , що легко розчиняється в шлаку.

### **2.5.2 Легування металу шва при зварюванні плавленням**

У ряді випадків зварювання склад металу шва для забезпечення належної його якості й експлуатаційних властивостей має відрізнитися від складу металу, який зварюють. Іноді треба компенсувати втрати легуючих елементів на випарювання і окиснювання. У зв'язку із цим, процесом, що супроводжує ряд інших видів металургійного оброблення (у першу чергу, розкиснення), є легування металу шва.

Чим активніше окиснюється легуючий елемент у зоні зварювання, тим менше його переходить у зварювальну ванну. За інших рівних умов (концентрації, температури, складу газової й шлакової фази) елементи, що є присутніми у зварювальній ванні, за зменшенням ступеня спорідненості до кисню при температурі до  $1600^\circ C$  можна навести у вигляді такого ряду:



Елементи, що знаходяться у цьому ряду праворуч від заліза, практично майже повністю засвоюються. Елементи, що розміщені ліворуч від заліза, в тій або іншій мірі окиснюються й лише частково легують метал шва. Ступінь легування тим менше, чим далі елемент

розташовано від заліза. Елементи *Al*, *Zr*, *Ti* при дуговому зварюванні покритими електродами практично повністю окиснюються. У наплавленому металі є лише незначні залишки цих елементів. Ці елементи досить повно засвоюються зварювальною ванною тільки при гранично можливому зниженні окисних умов (зварювання в інертних газах, вакуумі, із застосуванням пасивних флюсів). У звичайних умовах *W* і *Mo* досить повно засвоюються зварювальною ванною; *Cr*, *Mn*, *V*, *Si* окиснюються й переходять у метал шва. При однакових умовах уведення у зварювальну ванну елемент з відносно більшою спорідненістю з киснем охороняє від активного окиснювання інші елементи, що мають меншу спорідненість з киснем. Наприклад, для більш повного засвоєння титану в зону зварювання доцільно вводити алюміній.

Проаналізувавши металургійні процеси при зварюванні, можна намітити шляхи легування металу шва, заздалегідь за допомогою розрахунків визначити його зразковий склад.

Легування металу при зварюванні є можливим під впливом металеві або шлакової фази, а також газів.

Основним способом легування металу шва є введення у зварювальну ванну відповідних елементів у металевому стані, зокрема, у вигляді сплавів. Легування в цьому випадку відбувається в результаті:

- надходження легуючого елемента з основного металу, що плавиться при зварюванні;

- надходження легуючого елемента з присадного металу (електродного дроту, що плавиться, електродного стрижня при дуговому і електрошлаковому зварюванні);

- введення легуючого елемента до складу електродного покриття, керамічного флюсу, шихти порошкового дроту або стрічки.

Хімічний склад наплавленого металу залежить від хімічного складу основного й присадного металів, а також металургійних процесів у зварювальній ванні.

Величина коефіцієнта засвоєння (переходу) залежить від декількох чинників: хімічної активності легуючого елемента, способу зварювання, процентного вмісту цього елемента в основному й присадному металах (табл. 9, 10).

Величини коефіцієнтів переходу залежать від способу й режиму зварювання, виду покриття, хімічної активності елементів. Коефіцієнти переходу елементів із дроту при газовому, аргонодуговому й вакуумному зварюванні для більшості елементів є близькими до одиниці. При зварюванні електродом, що плавиться, ці коефіцієнти є дуже нестабільними (табл. 11 – 14).

Поряд з легуванням металу через металеву фазу є можливим легування металу шва під впливом шлакової фази.

Таблиця 9 – Значення коефіцієнтів засвоєння елементів при зварюванні у вуглекислому газі

Об'єкт дослідження	Коефіцієнт засвоєння елементів, %				
	C	Mn	Si	Cr	Ti
Вихідна концентрація	0,10	0,51	0,48	18,8	0,56
Шов	0,10	0,40	0,45	17,7	0,24
Коефіцієнт засвоєння	1,0	0,78	0,78	0,94	0,42
Вихідна концентрація	0,28	1,01	1,07	0,95	-
Шов	0,22	0,81	0,87	0,89	-
Коефіцієнт засвоєння	0,79	0,80	0,81	0,94	-
Вихідна концентрація	0,19	0,73	0,70	0,47	-
Шов	0,14	0,57	0,56	0,41	-
Коефіцієнт засвоєння	0,74	0,78	0,73	0,87	-
Вихідна концентрація	0,17	0,67	0,43	-	-
Шов	0,12	0,27	0,16	-	-
Коефіцієнт засвоєння	0,71	0,55	0,37	-	-

**Примітка.** При вихідному вмісті CO, що дорівнює 0,07...0,10 %, спостерігається його вигорання, а при вмісті – 0,05... 0,06 % – відновлення.

Таблиця 10 – Значення коефіцієнтів засвоєння елементів при зварюванні під флюсом

Елемент	Флюс	Концентрація елемента у дроті, %	Коефіцієнт засвоєння
C	АН-348А	до 1,6	0,08
		1,6...2,1	0,17
Si	АН-348А, ОСЦ-45	до 2,0	0,41
		2,0...4,0	0,45
		4,0...7,0	0,81
Mn		до 3,0	0,32
		3,0...8,5	0,47
Cr	АН-348А	до 3,0	0,76
		3,0...6,0	0,86
		6,0...8,0	0,98
	ОСЦ-45	до 3,0	0,61
		3,0...6,0	0,65
		6,0...8,0	0,70
W	АН-348А, ОСЦ-45		0,89
Mo			0,97
Cu			0,95
Ni			1,00
Ti	АН-348А	до 4,0	0,07
		4,0...6,0	0,11
Al		до 2,0	0,19
		2,0...6,0	0,26

Таблиця 11 – Значення коефіцієнтів переходу хімічних елементів із дроту при ручному дуговому зварюванні

Елемент	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>
Коефіцієнт переходу	0,4...0,5	0,5...0,6	0,6...0,7	0,85...0,95	0,8...0,9

Таблиця 12 – Коефіцієнти переходу хімічних елементів з основного покриття

Елемент	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>V</i>	<i>Mo</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
Коефіцієнт переходу	0,46 ...0,6	0,25 ...0,35	0,55 ...0,70	0,80 ...0,85	0,80 ...0,85	0,85 ...0,92	0,96 ...1,0

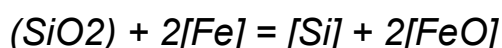
Таблиця 13 – Коефіцієнти переходу хімічних елементів при зварюванні в захисних газах

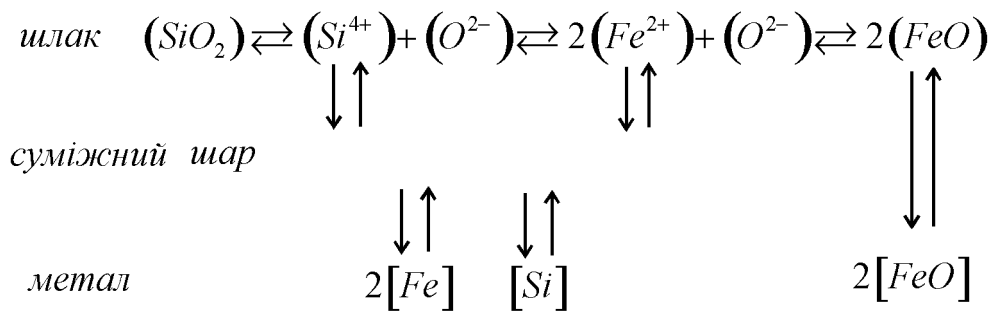
Вид зварювання	Коефіцієнти переходу елементів			
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>
Зварювання в $Z_2$ дротовими електродами: 12X18H9T Св-18ХГСА 10 ГС	–	0,78	0,78	0,94
	0,79	0,80	0,81	0,94
	0,71	0,55	0,37	–
Зварювання в $Ar + 5\% \text{PRO}_2$ дротовими електродами: Св-18ХГСА 10 ГС	0,60	0,69	0,71	0,92
	0,59	0,41	0,32	–

Таблиця 14 – Коефіцієнти переходу елементів із флюсу

Елемент	<i>C(графіт)</i>	<i>C(Fe-спл)</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
Коефіцієнт переходу	0,28	0,7	0,52	0,37	0,75	0,98

Це відбувається в результаті відновних процесів. Легування металу шва в результаті обмінних реакцій звичайно використовують за необхідності введення невеликих кількостей легуючих елементів:

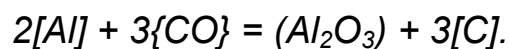




Такий спосіб легування підвищує окисненість металу шва. Найчастіше ним користуються при зварюванні під флюсом. Цей спосіб можна використовувати для легування елементами, що мають спорідненість з киснем меншу, ніж залізо (*Co, Cu, Ni*), і обмежено застосовувати для легування такими елементами, як *Cr, Si* і *Mn* (приріст *Si* і *Mn* не більше 0,3...0,4 %).

Легувати метал шва може й газова фаза. Але цей процес є супутнім і, як правило, шкідливим. Його можна спостерігати при зварюванні у вуглекислому газі або електродами з основним покриттям при ручному дуговому зварюванні (РДЗ). У цьому випадку є можливим науглецьовування металу шва майже до 0,05 %.

При значній концентрації алюмінію в електродному дроті або в покритті може відбуватися реакція



У цьому випадку збільшення вуглецю може досягати 0,1...0,2 %.

Значне насичення металу шва вуглецем буде також при газовому зварюванні науглецьовувальним полум'ям.

Легування металу здійснюється у всіх зонах зварювання, але найбільш енергійно й повно – у процесі краплеутворення.

Оскільки коефіцієнти переходу залежать від багатьох фізичних і технологічних факторів, то задачу розрахунку складу наплавленого металу розв'язують тільки в першому наближенні.

### 2.5.3 Рафінування металу шва при зварюванні плавленням

**Рафінування** (від фр. *raffiner* – очищати) – це очищення від сторонніх домішок якого-небудь технічного продукту. При зварюванні сталей це є видалення з металу шва шкідливих домішок – сірки S і фосфору P.

**Взаємодія із сіркою.** Сірка є шкідливою домішкою в сталях. Максимальна розчинність сірки в сталях – 0,02 %. У зварювальну ванну вона потрапляє з основного металу, зварювального дроту, а іноді з покриття електродів або флюсу. У металі сірка може існувати у вигляді сполук – сульфідів. Особливо шкідливим є сульфід заліза *FeS*, здатний розчинятися як у металі, так і шлаку. При цьому, якщо його роз-



чинність у шлаку досягає 2 %, то в металі його розчинність обмежена 5...7%.

Сульфід заліза має температуру плавлення 1195 °С, що значно нижче температури плавлення сталей. Крім того, сульфід заліза утворює подвійні евтектики:



Можливим також є утворення потрійної евтектики:



У легованих сталях може існувати сульфід нікелю з температурою плавлення близько 800 °С або евтектика:



При великому вмісті сірки в сталі утворюється  $\text{FeS}_2$ .

Звичайно сірчиста евтектика  $\text{FeS} + \text{Fe}$  розташовується на межах зерен. При нагріванні близько 1000 °С відбувається оплавлення легкоплавкої й тендітної евтектики, утворюються надриви, тріщини, тобто спостерігається червоноламкість металу. У зварюваних з'єднаннях це призводить до гарячих (кристалізаційних) тріщин.

Крім того, збільшення вмісту сірки в сталях на 0,01 % підвищує температурний поріг холодноламкості сталі на 10 °С.

Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталях підсилюється шкідливий вплив сірки на властивості металу, тому що вуглець сприяє ліквідації сірки.

Небезпечна концентрація сірки в сталях – більше 0,05 %. Тому за стандартами вміст сірки у вуглецевих сталях обмежують до 0,04 %, у легованих – до 0,02...0,03 %. Лише в сталевих виливках вміст сірки обмежується величиною 0,05 %.

Оскільки металева фаза (основний і присадний метал) містять сірки до 0,05 %, то при зварюванні в захисних газах немає необхідності рафінування. Така потреба виникає, якщо є шлакова фаза. У шлаку сірка й фосфор – немінучі домішки вихідних компонентів. Наприклад, граніт, що входить до складу електродних покриттів, містить до 0,1 % сірки, стільки ж сірки є й у плавиковому шпаті  $\text{CaF}_2$ , що входить до складу більшості електродних покриттів, флюсів. Феросплави, що є складовими керамічних флюсів, шихти порошкового дроту містять 0,1...0,2 % сірки й до 0,3 % фосфору. Коефіцієнт переходу сірки зі шлаків у метал – 0,3. Тому за наявності шлакової фази є цілком можливим насичення металу шва до величин, що викликають утворення гарячих тріщин.

Для виключення шкідливих впливів сірки на властивості металу

насамперед обмежують її вміст у сталях (табл. 15). При необхідності використовують більш чисті за вмістом сірки й фосфору метали, наприклад, високоякісні сталі, ті, що переплавляються електрошлаковим або іншим способом, а також отримані з руд шляхом прямого відновлення (сталь марки 20 ПВ містить усього лише від 0,002 до 0,015 % сірки).

Таблиця 15 – Вміст сірки й фосфору у низьковуглецевому зварювальному дроті

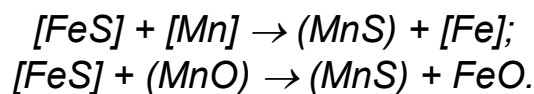
Марка дроту	Св-08	Св-08А	Св-08АА
S не більше, %	0,04	0,03	0,02
P не більше, %	0,04	0,03	0,02

У зварювальних флюсах, призначених для зварювання низьковуглецевих сталей, обмежують вміст S і P до 0,10...0,15% кожного, а у флюсах, використовуваних для зварювання легованих сталей, ця межа становить 0,05...0,08%.

В ацетилені вміст шкідливих домішок обмежують такими величинами:  $PH_3 \leq 0,02 \%$ ,  $H_2S \leq 0,05 \%$ .

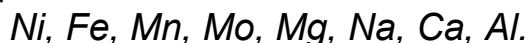
Для видалення сірки з металу шва використовують процес десульфурзації, який полягає в уведенні у зварювальну ванну елементів, що мають більшу спорідненість з сіркою, ніж залізо. Сульфід елемента, що утворюється, погано розчиняється в металі й добре в шлаку. Таким елементом є марганець, що має більшу спорідненість з сіркою. Сульфід марганцю не розчиняється в металі, має малу щільність, легко переходить в шлаки зварювальної ванни, має температуру плавлення  $1610^\circ C$ , що вище температури плавлення сталі.

Процес відбувається за реакціями:

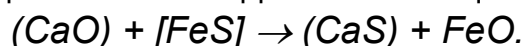


FeO частково залишається в металі, а частина його відповідно до закону Нернста переходить у шлакову фазу.

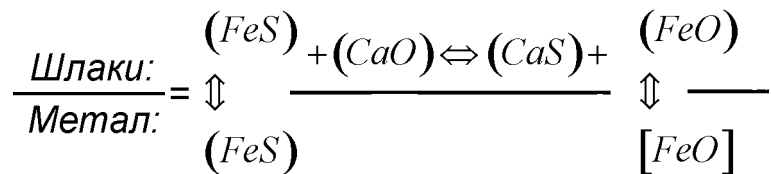
Спорідненість елементів з сіркою в міру їх наближення до неї становить такий ряд:



Такого ж ефекту досягають введенням кальцію за реакцією



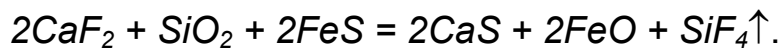
При цьому реакція між сульфідом заліза FeS, що розчиняється у шлаку, і оксидом кальцію CaO відбувається як у шлаку, так і на межі метал-шлаки:



Сульфід кальцію  $CaS$ , що утворюється, є розчинним у шлаку й не розчинним у металі, тому сірка віддаляється в шлаки.

Оксид кальцію одержують розкладанням у дузі мармуру  $CaCO_3$ .

Отже, очищення сталей від сірки здійснюють за допомогою основних окислів. Корисно діє плавиковий шпат  $CaF_2$ , переводячи частину сірки в летку сполуку  $SF_6$ . Крім того, відбувається така реакція:



**Взаємодія з фосфором.** Фосфор також – шкідливий домішок в сталях. Шляхи попадання його в шов є такими ж самими, що й сірки. Фосфор у металі шва розташовується за межами зерен у вигляді легкоплавкого прошарку й призводить до сильної неоднорідності металу, збільшення зерен і зниження пластичності, особливо при низьких температурах, викликаючи холодноламкість металу. Збільшення вмісту фосфору в сталях на 0,01 % підвищує температуру порога холодноламкості металу на 20 °С.

Фосфор видаляють окисненням з подальшим зв'язуванням у міцну сполуку, яка переходить у шлаки.

У сталях фосфор може існувати у вигляді фосфідів  $Fe_3P$  і  $Fe_2P$ . Фосфіди також, як і сульфіди сприяють утворенню в металі шва гарячих тріщин (температура плавлення  $Fe_2P$  дорівнює 1290 °С). Крім того, у сталях і чавунах можливим є утворення фосфідної евтектики, що складається з твердого розчину  $Fe$ ,  $Fe_3P$ ,  $Fe_3C$ , який має температуру плавлення 950 °С.

У нержавіючих Cr-Ni-сталях і нікелевих сплавах є можливою евтектика  $Ni_3P$ -Ni с  $T_{пл} = 880$  °С.

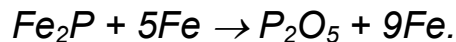
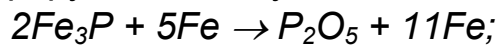
Вміст фосфору в шихті флюсу може досягати 0,35 % і більше. Фосфором забруднені марганцеві руди, які використовують для виготовлення як флюсів, так і електродних покриттів. При плавленні шихти флюсу вміст фосфору знижується, але у високомарганцевих плавлених флюсах кількість фосфору знаходиться на рівні до 0,15 %. У плавлених і керамічних флюсах, що не містять марганцевої руди, концентрація фосфору не перевищує 0,05 %.

З метою зменшити негативний вплив фосфору на властивості металу насамперед обмежують його вміст в основному й присадному металах (до 0,04 % у низьковуглецевих і до 0,02 % у легованих сталях). У дроті, призначеному для зварювання високоміцних сталей, вміст фосфору не має перевищувати 0,01 %. У зварених швах устат-

кування АЕС, щоб уникнути радіаційної крихкості, вміст фосфору не має бути вище 0,012 %.

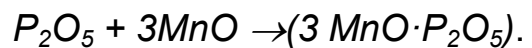
Видалення фосфору з металу в шлаки здійснюють у два етапи. Спочатку його окиснюють, утворюючи фосфорний ангідрид  $P_2O_5$ , потім  $P_2O_5$  з'єднують у стійкі комплексні сполуки з основними або амфотерними окислами. Комплексні сполуки, що утворилися, переходять у шлакову фазу.

Окиснення фосфору може відбуватися за такими реакціями:

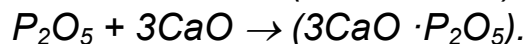
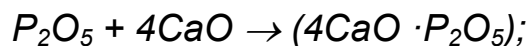


За ступенем збільшення хімічної спорідненості з  $P_2O_5$  оксиди розташовані в такий ряд:  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ .

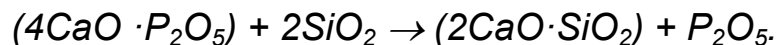
Сполучення фосфорного ангідриду відбувається за такими реакціями:



Найбільш активно відбуваються реакції:



У шлаку треба мати надлишок  $CaO$ , щоб зв'язати як  $P_2O_5$ , так і  $SiO_2$ . У протилежному випадку можлива реакція



Реакції видалення фосфору – екзотермічні, тому ефективніше відбуваються при зниженні температури зварювальної ванни й шлаків.

### **3 МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЗАХИСТУ ЗОНИ ЗВАРЮВАННЯ**

#### **3.1 *Металургійні процеси при зварюванні незахищеним електродом***

При безпосередньому контакті рідкого металу з навколишньою атмосферою – повітрям – спостерігається досить сильне насичення металу шва киснем й азотом (що перевищує в десятки разів вміст цих газів у зварюваному металі), а також значне вигорання корисних домішок (табл. 16). Майже весь кисень тут існує в найбільш несприятливій формі – у вигляді  $FeO$ .

При подібному вмісті газів механічні властивості металу шва є дуже низькими (ударна в'язкість – 5 ... 25 Дж/см<sup>2</sup>, кут загину – 35...45°). Метал має низьку деформаційну здатність і може руйнуватися без видимих ознак пластичної деформації, тобто крихко, й не може за своїми властивостями задовольняти різноманітним і часто тяжким умовам

роботи відповідальних зварених конструкцій.

Таблиця 16 – Хімічний склад сталі й електродів

№ п/п	Марка сталі й електрода	Хімічний склад, %				
		C	Si	Mn	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	Листова сталь Ст. 20	0,24	0,20	0,50	0,0033	0,0020
2	Зварювальний дріт	0,17	0,02	0,54	0,0171	0,0035
3	Метал шва при зварюванні голим електродом	0,021	0,014	0,09	0,304	0,1809
4	Метал шва при зварюванні крейдовим електродом	0,07	Сліди	0,20	0,35	0,18

Значна насиченість зварювальної ванни газами й підвищена швидкість охолодження металу є однією з основних причин утворення пор у таких швах.

Зварне з'єднання з металом шва певного хімічного складу й властивостей одержують двома шляхами:

- застосуванням захисних газів і шлаків;
- ізоляцією всієї зони зварювання від навколишнього середовища (наприклад, зварювання у вакуумі).

Газове або шлакове захисне середовище може бути нейтральним відносно рідкого металу, але частіше за все робить на нього активний металургійний вплив.

### **3.2 Металургійні процеси при зварюванні в інертних газах**

При зварюванні в захисних газах розплавлений метал зварювальної ванни й присадного дроту знаходиться в безпосередньому контакті з газовим середовищем, яке утворює захисний газ.

При цьому паралельно відбуваються дві групи процесів:

- реакції між елементами рідкого металу;
- процеси взаємодії рідкого металу зварювальної ванни й присадного матеріалу з навколишнім середовищем.

При зварюванні під захистом інертних газів металургійні процеси відбуваються тільки між елементами металу зварювальної ванни. Інертні захисні гази (аргон, гелій) не розчиняються в розплавленому металі й не утворюють у ванні хімічних сполук, не взаємодіють із газовою й конденсованими складовими середовища стовпа дуги. Можливою є тільки взаємодія рідкого металу з домішками, внесеними в зону зварювання інертним газом (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>).

Оскільки вміст азоту в інертному газі є найбільшим, слід очікува-

ти більшого його розчинення в металі.

На межі рідкий метал – газова фаза може спостерігатися деяке розчинення в металі кисню. При цьому є можливим окиснювання металу, однак швидкість окисних реакцій тут буде невисокою.

На межі рідкого металу з газовим середовищем будуть також спостерігатися такі процеси:

- часткове випарювання металу з поверхні та його перехід у пароподібному вигляді в газову фазу;

- руйнування наявних на поверхні зварювальної ванни оксидних плівок під дією катодного розпилення, коли катодом є поверхня ванни.

Катодна поверхня руйнується області катодної плями у результаті бомбардування важкими позитивно зарядженими іонами аргону. Наслідком цього є значний розігрів невеликої ділянки поверхні з частковим її випарюванням.

Характер процесів, що відбуваються у рідкому металі, визначається особливостями металу, що зварюють. Стосовно до зварювання звичайної маловуглецевої сталі слід зазначити два можливих випадки зварюваного металу:

- добре розкиснений, сталь спокійна;
- погано розкиснений, сталь кипляча.

При зварюванні в інертних газах спокійних добре розкиснених маловуглецевих сталей, що містять малу кількість кисню й зберегли як домішки необхідну кількість кремнію й марганцю, реакція розкиснення вуглецем бурхливо не протікає й до початку кристалізації звичайно припиняється. Цьому сприяють обмінні реакції розкиснення кремнієм і марганцем. Особливо важливою тут є роль кремнію як розкиснювача. При температурах, близьких до температур затвердження сталі, кремній повністю заглушує реакцію вигоряння вуглецю й цим сприяє одержанню щільних безпористих швів.

Киплячі сталі зварюються в інертних газах набагато гірше; у цих сталях майже немає кремнію, марганцю мало. Тому до початку кристалізації йде процес вигоряння вуглецю, і у шві з'являються пори.

Таким чином, при зварюванні в інертних газах відбувається своєрідне переплавлення основного й присадного металів, тому що спеціально метал не розкиснюється й не легується. Отже, хімічний склад металу шва визначається складом основного й присадного металів.

### **3.3 Металургійні процеси при зварюванні у вуглекислому газі**

При зварюванні в  $\text{CO}_2$  плавким електродом у зоні зварювальної ванни створюється окисне середовище. При цьому газове середовище є досить складним, тому що крім вуглекислого газу й продуктів його дисоціації –  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_2$ , сюди можуть потрапити в деяких кількостях і скла-

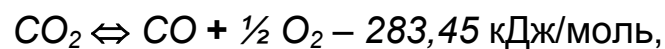
дові повітря – азот, кисень, водень та ін. Разом із цим залежно від розглянутої ділянки зони зварювання кількісне співвідношення між такими газами буде різним.

Металургійні процеси при зварюванні в  $CO_2$  відбуваються у таких фазах:

- у самому газовому середовищі між газами;
- контакті газового середовища з рідким металом;
- рідкому металі.

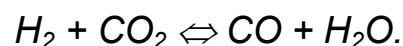
Для газового середовища характерною є взаємодія вуглекислого газу й продуктів його дисоціації, які потрапили з тих або інших причин у це середовище, – киснем, воднем й азотом.

Додаткове надходження кисню відображається на положенні рівноваги реакції

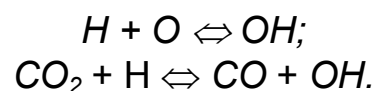


яке зміщується вліво, що приводить до збільшення окисної спроможності захисного середовища.

Молекулярний водень в області знижених температур (наприклад, у зварювальній ванні) буде взаємодіяти з вуглекислим газом за реакцією

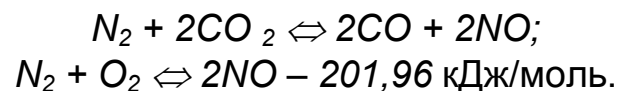


У зв'язку із цим парціальний тиск водню над металом буде зменшуватися. В області високих температур, де переважно буде знаходитися атомарний водень, його парціальний тиск над металом (краплею) виявиться також невисоким внаслідок реакцій:



Отже, в умовах захисту зони зварювання вуглекислим газом значного насичення металу шва воднем бути не може.

Наявність азоту в розглянутому середовищі приведе до реакцій

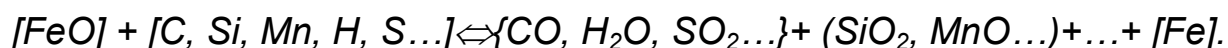


Ці реакції знижують парціальний тиск азоту над металом і зменшують активність його розчинення в краплях і зварювальній ванні. Однак стійкий дрібнокрапельний, навіть струминний перенос металу, що спостерігається у вуглекислому газі, створює більшу сумарну поверхню зіткнення краплі рідкого металу з газовим середовищем, особливо в момент знаходження їх у високотемпературній зоні. Тому, незважаючи на зниження парціальних тисків, газу встигають розчинитися в металі.

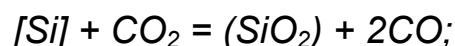
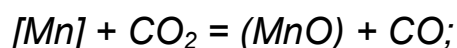
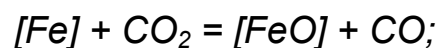
Ті ж процеси, але в меншій кількості, відбуваються й при контакті поверхні зварювальної ванни з газовим середовищем. На поверхні зварювальної ванни найбільшого значення набувають процеси окиснення металу як вільним киснем, так і вуглекислим газом. У зоні зварювання окиснювання здійснюється переважно завдяки вільному кисню, тому що окиснювання вуглекислим газом відбувається при знижених температурах. З оксидів, що утворюються, головна роль належить  $FeO$ , що розчиняється в залізі. Останні ж оксиди залишаються на поверхні ванни у вигляді плівки шлаків ( $SiO_2$ ,  $MnO$  й ін.) або виділяються в газову фазу (наприклад,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  й ін.).

Крім окиснювання є можливим процес випару металів. Кількість пар, що утворюються, і їхній склад залежать від складу електродного металу. Наприклад, при зварюванні звичайної маловуглецевої сталі із застосуванням кремнемарганцевистого електродного дроту крім заліза буде інтенсивно випаровуватися  $Mn$ .

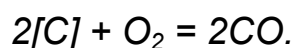
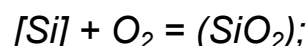
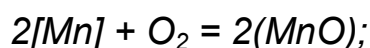
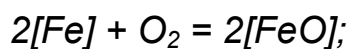
У рідкому металі відбуваються такі процеси: кисень, що розчиняється в рідкому металі, реагує з домішками металу і окиснює їх за таким рівнянням загального типу:



Реакції окиснення металу можуть відбуватися безпосередньо в  $CO_2$ :



або в продуктах його дисоціації:



Аналогічно відбувається окиснення металу атомарним киснем, оскільки в дузі  $O_2$  дисоціює ( $O_2 = 2O$ ).

При застосуванні звичайного маловуглецевого зварювального дроту, наприклад електрода, реакції з утворенням оксидів типу  $SiO_2$ ,  $MnO$  та інших розвиваються слабо. Більш інтенсивно відбуваються реакції з виділенням газоподібних продуктів, особливо  $CO$ . У цьому



випадку у швах часто утворюється пористість, яка підсилюється при зварюванні погано розкиснених сталей.

Тому при зварюванні у вуглекислому газі необхідно:

- 1) гальмувати процеси насичення рідкого металу газами;
- 2) зв'язувати й видаляти з розплавленого металу газу, що розчинилися в ньому.

Найпростішим шляхом це досягається при застосуванні присадного металу дроту, що містить розкиснювачі, наприклад *Si*, *Mn*, *Ti* й ін.

Наявність у рідкому металі достатньої кількості розкиснювачів забезпечує ефективну сполуку кисню в конденсовані оксиди, що спливають на поверхню металу (*SiO<sub>2</sub>*, *MnO*, *TiO<sub>2</sub>*). Процеси розкиснення припиняють реакції вигорання вуглецю, що сприяє одержанню щільних безпористих швів. Шлаки, що утворюються при цьому, за своїм складом є найпростішими і являють собою комплексні з'єднання продуктів розкиснення рідкого металу із частково розчиненим в такому шлаку *FeO*. Кількість шлаків, що утворюються, є невеликою й залежить від хімічного складу електродного дроту, основного металу й режиму зварювання. Звичайно загальна кількість шлаків знаходиться в межах 0,3...1,2 % від кількості наплавленого металу.

Для зварювання у вуглекислому газі маловуглецевої сталі застосовують маловуглецеві кремнемарганцевисті дроти, що мають підвищений вміст кремнію й марганцю, наприклад, Св10ГС, Св08ГСА, Св08М2СА й ін. У цьому випадку хімічний склад металу шва є близьким до складу сталі, що зварюють, але в ньому трохи підвищено вміст *Si* і *Mn*.

Для зменшення окиснювального потенціалу захисного середовища використовують газові суміші, наприклад 80% *Ar*+*CO<sub>2</sub>*. Заміна вуглекислого газу на газову суміш *Ar*+*CO<sub>2</sub>* при зварюванні значно зменшує розбризкування металу, що є одним з головних недоліків зварювання у вуглекислому газі.

При зварюванні суцільними дротами легування металу шва відбувається з використанням зварювального дроту й розплавленого основного металу.

### **3.4 Металургійні процеси при ручному дуговому зварюванні товстопокритими електродами**

При дуговому зварюванні товстопокритими електродами (рис. 7) дуга горить між електродом й основним металом. Під дією теплоти дуги електрод й основний метал розплавляються, утворюючи зварювальну ванну. Разом з металевим стрижнем плавиться і електродне покриття, внаслідок чого у зварювальну ванну разом із краплями металу потрапляє й розплавлене покриття. Воно взаємодіє з металом протя-

гом всього процесу, а потім спливає на поверхню зварювальної ванни й покриває її захисним шаром – шлаком. Рідкий метал взаємодіє не тільки з розплавленим покриттям – шлаками, але частково й з газовим середовищем, до складу якого, крім складових покриття, входять і пари металу, що не виключає можливості деякого розчинення в металі шкідливих газів і домішок як з газового середовища, так і при контакті зі шлаком, у якому є кисневовмісні сполуки й шкідливі домішки (S і P). Все це потребує істотного металургійного оброблення металу у вигляді розкиснення, легування й рафінування.

На рис. 7 показано область зварювання і її окремі зони або ділянки, для яких є характерним розвиток тих або інших процесів.

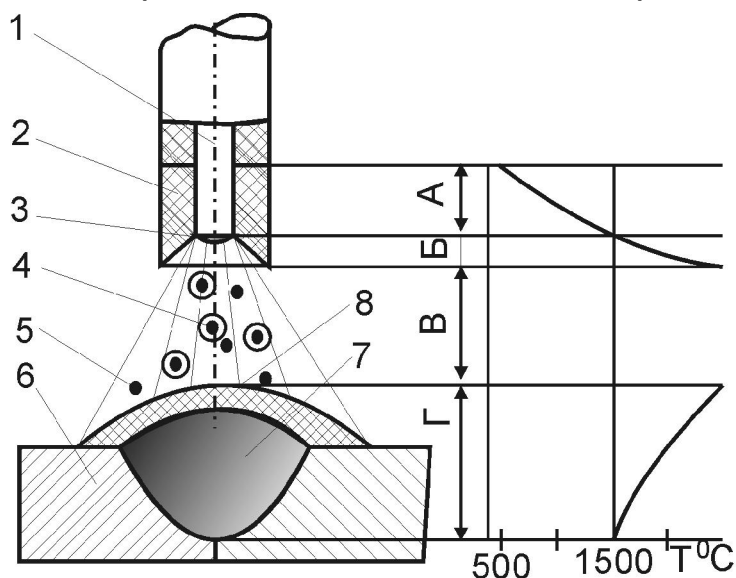
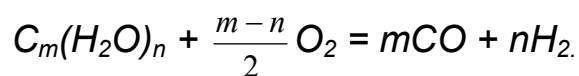


Рисунок 7 – Схема горіння товстопокритого електрода:

1 – стрижень електрода; 2 – покриття електрода; 3 – рідкий метал торця електрода; 4 – краплі зі шлаковою оболонкою; 5 – газовий захист; 6 – основний метал; 7 – зварювальна ванна; 8 – шлаки

електрода, що примикає до робочого торця й нагрівається від 100°C до температури плавлення електродного покриття. На цій ділянці електрода здійснюються такі процеси:

- при нагріванні до 100°C із покриття виділяється волога;
- в області нагрівання до 250...300°C (ближче до торця електрода) починається розпад органічних складових покриття (створюється відбудовна атмосфера):



Загальна кількість газів може бути досить великою – до 300 см<sup>3</sup>

на 1 см<sup>3</sup> розплавленого електрода;

– при нагріванні до 350...450<sup>0</sup>С з електродного покриття виділяється кристалізаційна вода;

– при температурі від 500<sup>0</sup>С до температури плавлення покриття починають відбуватися реакції:

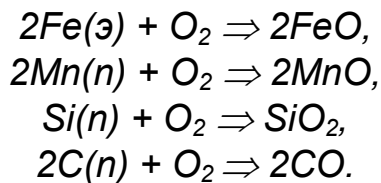
а) дисоціації карбонатів, що входять у покриття, наприклад CaCO<sub>3</sub>:



б) переходу вищих оксидів у нижчі, наприклад:



в) окиснювання виділеним вільним киснем поверхневого шару металу електродного стрижня й деяких складових покриттів (наприклад феросплавів):



Окисні процеси, що розвиваються в першій зоні, зменшують кількість розкиснювачів і легуючих елементів, що попадають із покриття в метал. Це є тим помітніше, чим більше в покритті з'єднань, що легко дисоціюють (віддають кисень), і чим менші за розмірами частки елемента, які окиснюються, що створює більшу сумарну поверхню контакту з окисним середовищем;

– у торця електрода покриття починає плавитися й безпосередньо контактує з краплею рідкого металу, що утворюється на торці електрода.

**Реакційна зона торця електрода.** Внаслідок більш уповільненого й нерівномірного плавлення обмазки порівняно зі стрижнем крапля на торці оточена своєрідним «чохлом» з обмазки, по внутрішніх стінках якого обмазка плавиться, стікає й покриває краплю металу шлаковою оболонкою. При цьому шлак інтенсивно перемішується з металом і частково попадає в середину краплі.

За малий час формування краплі на торці електрода (0,1... ...0,01 с) найбільш важливим процесом є її інтенсивне легування, яке становить щодо деяких елементів 50...80% їхнього остаточного вмісту в металі шва. Інтенсивному розвитку легування краплі сприяє висока температура на торці електрода, що є близькою до температури кипіння металу. Внаслідок цього спостерігається:

– висока швидкість реакцій;  
– знижена спорідненість переважної більшості елементів з киснем.

Прискоренню легування сприяє й механічне перемішування металу краплі, що відбувається в результаті бурхливого виділення газів.

Крім легування в металі краплі будуть здійснюватися такі процеси:

- деяке розчинення газів при контакті з газовим середовищем;
- розкиснення металу краплі вуглецем, що також сприяє енергійному перемішуванню краплі й передчасному відриву її від торця електрода;
- часткове випарювання з поверхні крапель деяких домішок з найменшою пружністю пари (*Mn*, *Cr*).

Коли під дією сил відриву крапля втрачає зв'язок з торцем електрода, вона потрапляє в третю зону – зону переходу металу в дузі.

**Зона переходу металу в дузі.** Час переходу краплі через дугувий проміжок є дуже малим і знаходиться в діапазоні 0,0001...0,001 с. Краплі при переході в дузі покриті шаром шлаків, товщина якого коливається від 0,06 до 0,2 мм. Поряд із краплями металу, покритими шлаками, у загальному потоці є й краплі шлаків. Незважаючи на малий час знаходження в дузі, в краплі продовжують активно розвиватися процеси, що відбуваються на торці електрода. Висока температура стовпа дуги (5000...6000<sup>0</sup>С) прискорює реакції й підсилює взаємодію шлаків, металу й газового середовища.

При цьому:

а) ряд оксидів дисоціюють, а відновлені елементи розчиняються в металі крапель, процес легування металу елементами покриття майже повністю закінчується;

б) триває випарювання окремих елементів, що є тим активніше, чим більше ступінь окиснення випарів цих елементів у газовому середовищі;

в) процес вигорання вуглецю підсилює газоутворення в середині крапель; під дією цього краплі дробляться, спотворюють свою форму і метал розбризкується;

г) значною є сумарна поверхня контакту краплі з газовим середовищем стовпа дуги, де переважно знаходяться атомарні гази й що приводить до насичення крапель цими газами.

**Реакційна зона зварювальної ванни.** У зварювальній ванні, куди надходять краплі електродного металу й шлакові частки, відбувається перемішування, поділ металу й шлаків і взаємодія цих двох фаз.

У момент занурення найбільш великих крапель у ванну під дією тривалого газоутворення в середині крапель руйнується шлакова оболонка, що огортає краплі, й вони розчиняються в загальному об'ємі металу, а шлакові частки, укрупнюючись, реагують із металом і підні-

маються на поверхню зварювальної ванни. Більш дрібні краплі відокремлюються від шлаків внаслідок різниці питомої ваги металу й шлаків.

Таким чином, на поверхні зварювальної ванни поступово створюється шлакове покриття, і тільки район плями дуги залишається вільним від шлаків.

Теплове й механічне перемішування об'єму ванни викликає загальне переміщення металу й шлаків у напрямку до задньої й бічної стінок ванни. Хімічна й фізична взаємодія металу й шлаків є досить складною й схематично може бути відображена такими процесами:

а) розкиснювальними на основі обмінних реакцій, а також комплексоутворенням з одержанням силікатів заліза, марганцю, титана й ін. При цьому реакція розкиснення вуглецем відбувається переважно в області підвищених температур, а останні реакції – у задній частині ванни при знижених температурах. При цьому досягнення стану рівноваги є малоімовірним;

б) рафінуванням металу, що здійснюється в процесі контакту шлаків і металу, особливо в задній частині ванни, де відбувається найбільш інтенсивне спливання укрупнених шлакових часток і своєрідне “промивання” ними металу;

в) остаточним процесом легування металу.

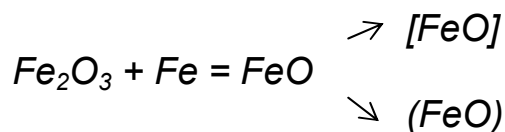
### **3.5 Металургійні процеси при зварюванні електродами руднокислого типу**

Рудно-кислі покриття – це покриття, що містять  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $SiO_2$  (іноді домішки  $TiO_2$ ). Як розкиснювач тут застосовується феромарганець, додатковий газовий захист створюють органічні продукти покриття (33 % гематиту, 32 % граніту, 30 % феромарганцю, 5 % крохмалю (або целюлози) й 25...30 % рідкого скла від маси сухої суміші).

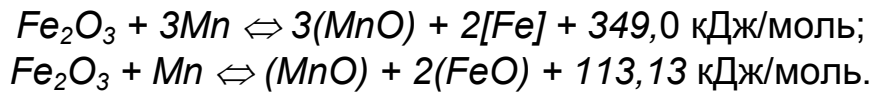
Типовим представником цієї групи електродів є електрод ЦМ-7. Температура плавлення шлаків цієї групи становить 1170 ...1250 °С. Після затвердіння зварювальні шлаки являють собою склоподібні темні скоринки майже без зовнішніх ознак кристалізації.

У покриттях даного типу причиною інтенсивного розвитку окисних процесів, що відбуваються у металі й шлаках, є вищі оксиди заліза:

а) гематит покриття, що взаємодіє з рідким металом і окиснює його:



б) гематит покриття, що взаємодіє з марганцем покриття і окиснює його:



Відновлення заліза й тепло, що виділяється при окиснюванні марганцю, забезпечує при зварюванні електродами ЦМ-7 високий коефіцієнт наплавлення, що дорівнює 10...11 г/(А год.).

Паралельно з окисненням марганцю оксидами заліза частина його реагує з кремнеземом, внесеним у покриття гранітом, тобто також окиснюється:



Внаслідок обмеженого вмісту вільного  $\text{SiO}_2$  у шлаку й наявності там  $\text{FeO}$  розвиток цієї реакції вправо є незначним.

Інтенсифікації цієї реакції перешкоджає висока концентрація окису заліза: вміст кремнію в металі шва становить близько 0,1 %, а марганцю – 0,75...0,8 %.

Помітне окиснювання зварювальної ванни приводить до окиснювання вуглецю. Однак при цьому концентрація кремнію й марганцю є достатньою для припинення реакції окиснювання вуглецю в задній частині зварювальної ванни, що кристалізується, й створення перешкоди утворенню пор від дії оксиду вуглецю.

Підвищене окиснення зварювальної ванни слід оцінювати позитивно, тому що це охороняє метал від надлишкового розчинення водню. Введення в подібну ванну додаткових розкиснювачів призвело б до інтенсивного поглинання ванною водню й розвитку пор. Шлаки цього типу обмежено видаляють сірку, ще менш – фосфор. Тому до електродної сировини ставлять підвищені вимоги щодо вмісту шкідливих домішок.

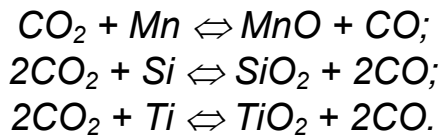
У цілому слід зазначити, що, незважаючи на неповне розкиснення металу, електроди з руднокислим покриттям забезпечують одержання металу шва з необхідними механічними властивостями.

### **3.6 Металургійні процеси при зварюванні електродами фтористокальцієвого типу**

Фтористокальцієві покриття – це покриття, що не містять оксидів заліза й марганцю. Основою покриття є мармур, плавіковий шпат, кварцовий пісок і рідке скло. Як розкиснювачі у покриття можуть входити феромарганець, феросиліцій, феротитан. Додатковий газовий захист забезпечує розпад при нагріванні карбонатів покриття. Для легування металу використовують різні металеві порошки.

Шлаки електродів цієї групи характеризуються шлаковою системою  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{CaF}_2$  (сюди відносять електроди типу УОНИ-13, ЦУ-1, ЦЛ-9, ЦТ-9 й ін.).

При розпаді карбонату кальцію виділяється значна кількість вуглекислого газу, що за допомогою розкиснювачів при температурі 700 °С відновлюється до CO в результаті таких реакцій:

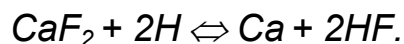


При цьому частина CO остається невідновленою, и газова фаза у всьому температурному інтервалі зони зварювання є окиснювальною відносно рідкого металу.

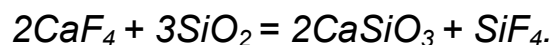
Шлаки, що утворюються, внаслідок низького вмісту оксидів заліза не створюють окисної дії на метал. Наявність у покритті групи розкиснювачів забезпечує проведення не тільки ефективного розкиснення металу, але й деякий перехід у метал домішок (наприклад *Mn* і *Si*).

З одного боку, високий ступінь розкиснення зварювальної ванни, а також присутність у металі *Mn*, а в шлаку CaO створюють умови для видалення сірки й фосфору з металу шва. Вміст сірки й фосфору в наплавленому металі не перевищує 0,035 % кожного й це робить шви, виконані електродами цієї групи, малочутливими до кристалізаційних тріщин.

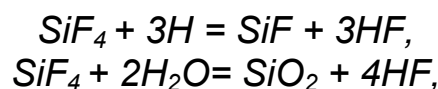
З іншого боку, розкиснення металу сприяє розчиненню в ньому водню. Вміст розчиненого в металі водню є настільки значним, що за наявності іржі на кромках, що зварюють, підвищеної вологості покриття, а також зварювання довгою дугою призводить до появи пор у шві, незважаючи на ефективне видалення водню за рахунок плавикового шпату, що є в покритті:



Наявність у покритті  $SiO_2$  приводить до утворення тетрафториду кремнію:



Тетрафторид кремнію переходить у газову фазу, де він взаємодіє з атомарним воднем або парами води:



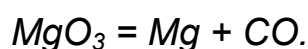
і тим самим сприяє зменшенню кількості водню в металі шва.

### **3.7 Металургійні процеси при зварюванні рутиловими електродами**

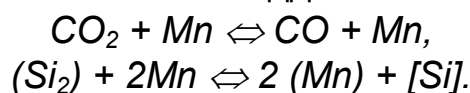
Рутилові покриття – це покриття з використанням рутилу ( $TiO_2$ ) з домішками польового шпату, магнезиту й інших шлакоутворювальних

складових. Як розкиснювач застосовується *FeMn*. Додатковий газовий захист забезпечує розпад при нагріванні карбонатів та органічних речовин, що внесені у покриття. Для підвищення коефіцієнта наплавлення в цю групу покриттів доцільно вводити порошок заліза. Представниками цієї групи є електроди ЦМ-9, АНО-4 та ін.

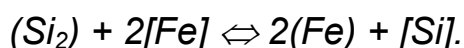
В основі зварювальних шлаків цієї групи знаходиться шлакова система  $TiO_2 - SiO_2 - MnO$ , що дозволяє одержати легкоплавкі евтектичні суміші з невеликою в'язкістю й високою рухливістю. Такі шлаки, незважаючи на кислий характер, відносять до коротких. Газовий захист цих покриттів є задовільним. Однак це середовище у повній мірі є окисним внаслідок наявності вуглекислого газу, що виділяється при дисоціації магнезиту:



Окиснюванню найбільш помітно піддається марганець покриття:



Розвитку останньої реакції вправо сприяє підвищена кислотність шлаків. Кислий характер шлаків стимулює попутно й обмінну реакцію:



Отже, у шві утворюється достатня кількість *Mn* і *Si*, але поряд із цим можуть бути різні силікатні вкраплення, що підвищують вміст кисню у шві. Електроди цієї групи мають позитивні якості:

- забезпечують відмінне формування шва;
- дозволяють вводити в покриття залізний порошок для збільшення коефіцієнта наплавлення;
- менше виділяють шкідливих для здоров'я газів.

### **3.8 Металургійні процеси при зварюванні електродами органічного типу**

Покриття органічного типу – це покриття з використанням органічних продуктів. Шлаковою основою тут є оксиди *Ti*, *Fe* і *Mn*. Як розкиснювачі застосовують *FeMn* і *FeSi*. Таке покриття мають електроди ОМА-2, ВСЦ-4 й ін.

Покриття цього типу містять до 50 % органічних складових (харчового борошна, целюлози, крохмалю та ін.), які при розкладанні в дузі створюють надійний газовий захист розплавленого металу. Коефіцієнт покриття становить 0,1...0,15. Газу, що виділяються при зварюванні, містять велику кількість водню.

Для попередження зайвої розчинності водню в металі у покриття вводять вищі оксиди металів, що створюють окисну дію на ванну рід-



кого металу ( $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MnO_2$ ). Наявність у покритті  $FeSi$  забезпечує гальмування реакції вигорання вуглецю, тому шви є щільними й мають необхідні механічні властивості. Введення в покриття плавикового шпату ( $CaF_2$ ), що за наявності  $SiO_2$  і  $TiO_2$  у зоні високих температур приводить до утворення  $SiF_4$  і  $TiF_4$ , що зв'язують водень у нерозчинну в металі сполуку  $HF$  і тим самим зменшують його вміст у зварювальній ванні.

Електроди цього типу забезпечують високе проплавлення металу, але їх використовують дуже рідко, тому що вони містять харчові продукти, застосування яких у технічних цілях заборонено (зокрема, пшеничне борошно).

### **3.9 Металургійні процеси при зварюванні під флюсом**

Металургійні процеси, що відбуваються при зварюванні під флюсом, мають дві основні риси, що відрізняють їх від процесів при зварюванні штучними електродами:

- створення більш ефективного захисту зони зварювання від контакту з повітрям;
- наявність більш певного зв'язку між режимом зварювання й хімічним складом металу шва.

Сучасні плавлені флюси мають здебільшого силікатну основу, і їх відносять до групи сплавлених шлаків. Залежно від кількісного вмісту головних оксидів, що являють собою силікатну систему флюсу, плавлені флюси можна поділити на три групи:

- 1) високомарганцевисті з вмістом  $MnO$  більше 20% (ОСЦ-45, АН-348А, АН-10, АН-60 та ін.);
- 2) середньомарганцевисті з вмістом  $MnO$  від 10 до 20% (АН-1, АН-2, ФЦ-1, АН-26 та ін.);
- 3) безмарганцевисті з вмістом  $MnO$  менше 2% (АН-20, ФЦЛ-2, ІМ-30 та ін.).

Дугове зварювання під флюсом має такі позитивні риси:

- є відсутньою необхідність проведення спеціального розкиснення внаслідок ефективного захисту зони зварювання від проникнення кисню повітря;
- внаслідок кремене- й марганцевідбудовних процесів відбувається невелике легування шва марганцем і кремнієм;
- повніше видаляються неметалічні вкраплення й підвищується стійкість металу шва проти тріщин завдяки окиснюванню вуглецю в металі ванни киснем, що надходить із рідкого флюсу;
- зводиться до мінімуму вміст сірки й фосфору в металі шва.

### 3.9.1 Процеси, що відбуваються у газовій фазі

Звичайно при зварюванні під флюсами-силікатами склад плазми дуги є досить складним, де поряд з парами металу й флюсу знаходяться гази, кількість яких залежно від умов зварювання коливається в широких межах (табл. 17).

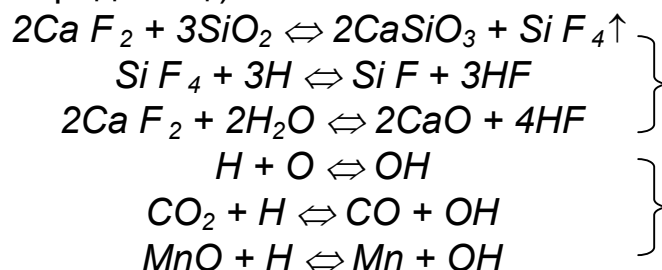
Таке газове середовище стосовно металу є відновлювальним. Висока температура середовища викликає інтенсивну дисоціацію ряду газів, таких як водень, азот, вуглекислий газ, фтористий кремній. При цьому фтористий кремній дисоціює за реакцією



Таблиця 17 – Склад атмосфери дуги при зварюванні під флюсом

CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SiF <sub>4</sub>
до 93%	до 25%	до 15%	до 6%	до 20%

Хімічні процеси, що відбуваються безпосередньо в газовому середовищі, є дуже важливими для одержання щільних безпористих швів. Найбільш істотними є реакції між фтором і воднем (енергійно відбуваються з використанням висококремнистих флюсів) і між воднем і киснем (гідроксил утворюється повільно внаслідок недостатності кисню в газовому середовищі):



### 3.9.2 Процеси, що відбуваються при контакті рідкого металу з газовим середовищем

Рідкий метал взаємодіє з газовим середовищем у процесі утворення краплі, при її переносі у зварювальну ванну, а також на поверхні зварювальної ванни (передньої її частини). При цьому є можливим:

- розчинення газів і парів у рідкому металі;
- частковий випар металу й деяких його домішок.

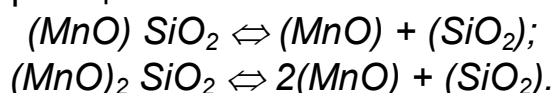
Ефективний захист всієї зони зварювання від дії повітря зводить до мінімуму проникнення азоту й кисню в газове середовище, а отже і в метал. Тому при зварюванні під флюсом найбільшу небезпеку являє насичення металу воднем, що попадає в зону зварювання іншими шляхами (вологий флюс, іржа на дроті й зварюваних кромках й ін.).

Процеси випарювання можуть існувати при утворенні крапель та їхньому переносі через високотемпературну область дуги. Крім наявності пари металу в дузі, там можуть бути й пари тих елементів і сполук, які мають низьку температуру кипіння й, отже, підвищену пружність пари (наприклад,  $Mn$ ,  $CaF_2$  та ін.). Наявність на краплях металу рідкого флюсу і їхнє перенесення у потоці флюсу запобігає значній частині металу безпосередньо контактувати з газовим середовищем. Однак за наявності поверхнево-активних речовин у складі флюсів їхня адсорбуюча здатність різко збільшується, й рідкий метал може насичуватися складовими газів через флюс.

### **3.9.3 Процеси, що відбуваються при контакті рідкого металу з флюсом**

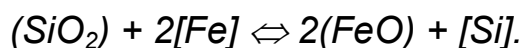
Контакт рідкого металу з флюсом відбувається на всіх ділянках зони зварювання. Ці фази взаємодіють досить енергійно, що пояснюється не тільки високими температурами середовища, але й більшими питомими поверхнями контакту металу з флюсом. На швидкість реакцій між металом і флюсом будуть впливати швидкості підведення до міжфазної межі реагуючих речовин і відведення від неї продуктів реакції.

Для більшості рідких плавлених флюсів-шлаків є характерною наявність вільних окислів  $SiO_2$  і  $MnO$ , що утворюються внаслідок дисоціації силікатів марганцю:



Концентрація вільних окислів  $SiO_2$  і  $MnO$  виявляється достатньо значною, й ці оксиди активно взаємодіють із рідким металом. При цьому на основі обмінних реакцій відбуваються два важливі металургійні процеси – кремне- й марганцевідбудовний.

При досить високому вмісті  $SiO_2$  у флюсі й низкій концентрації  $FeO$  може відновлюватися кремній:



Цей процес у напрямку праворуч відбувається у високотемпературній зоні зварювання (у краплях і передній частині зварювальної ванни). У цьому випадку  $FeO$  поділяється між шлаками й металом і переважно переходить у шлаки.

Однак зі зменшенням температури концентрації у ванні  $Si$  і  $O$  стають більш рівноважними й починається реакція окиснювання кремнію внаслідок розчинення в залізі кисню. Кінцевий вміст кремнію у шві буде трохи підвищеним, тому що для повного окиснювання кремнію, що перейшов у метал, наявного кисню, що встиг до того ж вступити в

реакцію з вуглецем, буде недостатньо.

На перехід кремнію із флюсу в метал впливають такі фактори:

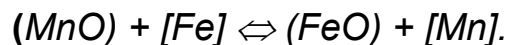
- вміст  $SiO_2$  у флюсі;
- вихідний вміст  $Si$  у металі краплі;
- режим зварювання.

При підвищеному вмісті  $Si$  в електродному дроті й малих концентраціях кремнію у флюсі, тобто при зниженій кислотності флюсу, може відбуватися й зворотний перехід кремнію з металу у флюс.

Зміна режиму зварювання приводить до посилення або послаблення переходу кремнію із флюсу в метал. З параметрів режиму зварювання найбільше впливають на цей процес напруга на дузі й величина струму. Зі збільшенням напруги на дузі й зменшенням величини струму прискорюється перехід кремнію в метал шва. Реакція за участю кремнію має велике значення при зварюванні маловуглецевих сталей, які особливо сильно киплять, коли як електродний дріт застосовується маловуглецева безкремениста сталь. Відомо, що за наявності в металі ванни відновленого кремнію близько 0,2% і більше, в металі ванни, що кристалізується, припиняються реакції вигорання вуглецю, і шви виходять щільними, без пор.

До негативних наслідків кременевідбудовного процесу слід віднести можливість засмічення шва дисперсними силікатними вкрапленнями, що негативно впливають на ударну в'язкість металу шва.

Реакція відновлення марганцю з  $MnO$ , що знаходиться у флюсі, має такий вигляд:

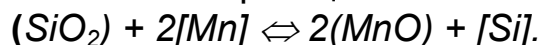


Перехід марганцю залежить від концентрації  $Mn$  у флюсі, ступеня кислотності флюсу (зниження у флюсі  $SiO_2$ ), а також вмісту оксидів заліза у флюсі.

Крім цього, розвиток марганцевідбудовного процесу залежить від режиму зварювання (подібно кременевідбудовному процесу).

При малих концентраціях  $Mn$  у флюсі (< 10%) не збільшується перехід марганцю в шов. Його вміст у шві виявляється менше ніж вихідна концентрація.

У цьому випадку окиснення марганцю пояснюється реакцією



### **3.10 Металургійні процеси при електрошлаковому зварюванні**

Процес електрошлакового зварювання (ЕШЗ) відбувається внаслідок виділення тепла при протіканні струму через рідкі шлаки. Це тепло підігріває шлаки і його температура є вищою температури плавлення металу. Внаслідок циркуляції шлаків тепло досить рівномірно розподіляється за об'ємом ванни й розплавляє як крайки металу, так і

електродний дріт.

В умовах ЕШЗ джерело тепла є менш концентрованим, ніж дуга. У результаті цього температура реакційної зони виявляється значно нижчою, ніж при дуговому процесі й не перевищує 1700 °С.

У ході зварювання електродний метал, що плавиться, поверхня металевої ванни, а також поверхня основного металу, що оплавляється, весь час активно обмиваються циркулюючими потоками рідкого шлаку й знаходяться в контакті з ним.

Флюси для електрошлакового зварювання повинні мати ряд специфічних властивостей, а саме:

- необхідну електропровідність у рідкому стані, що забезпечує стійкість електрошлакового процесу;

- певну в'язкість розплавленого флюсу, що змінюється зі зміною температури;

- необхідну металургійну активність, що сприяє введенню в метал шва корисних домішок (*Mn*, *Si* та ін.), а також більш повному звільненню металу від шкідливих домішок – сірки й фосфору.

Рідкий флюс повинен мати досить високий питомий опір для перетворення електричної енергії в теплову.

Необхідно, щоб в'язкість шлаків була в певних межах. Рідкоплинний і довгий шлак може надходити з ванни в зазори. Надмірно грузлий і "короткий" шлак може викликати віджимання повзунів, що також порушує нормальний хід процесу.

Металургійні процеси при ЕШЗ відрізняються від дугового зварювання такими особливостями:

- у плавильній зоні є відсутньою газова фаза;

- температура в зоні зварювання є нижчою, ніж при дуговому зварюванні;

- змінність шлаку-флюсу є незначною;

- при зварюванні відбувається електроліз шлаків шлакової ванни;

- поверхня шлакової ванни помітно окиснюється киснем повітря.

Через відсутність газової фази основну роль відіграють металургійні процеси між рідкими шлаками й металом.

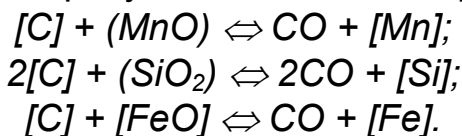
Найважливішими металургійними реакціями між шлаками й металом є реакції *Mn*, *Si* з вуглецем, фосфором і сіркою. На перехід *Mn* і *Si* у металеву ванну впливає вміст у шлаку *FeO*, *MnO* і *SiO<sub>2</sub>*, а також вміст *Mn* і *Si* в електродному дроті.

При ЕШЗ перехід *Mn* і *Si* буде нижчим, ніж при дуговому зварюванні, особливо якщо флюс – кислий.

Крім того, перехід марганцю й кремнію гальмує збагачення шлаків оксидом заліза *FeO*. Це виявляється при зварюванні довгих швів внаслідок поступового нагромадження *FeO* (після виконання частки

шва довжиною 150... 200 мм припиняється відновлення кремнію й марганцю зі шлаків). Окисна здатність шлаків при цьому буде збільшуватися, тому реакції почнуть стимулювати окиснення *Si* і *Mn*.

Реакція окиснення вуглецю відбувається як за рахунок розчиненого в металі кисню, так і за рахунок оксидів, що втримуються у флюсі:



За наявності вуглецю в електродному дроті, а також при нагромадженні оксидів заліза в шлаку процес окиснювання вуглецю підсилюється. Однак у всіх випадках окиснювання вуглецю при електрошлаковому зварюванні є нижчим, ніж при дуговому, що пояснюється більш низькими температурами. Щоб реакції окиснювання вуглецю не призвели до пористості зварного шва, у зварювальній ванні слід мати достатню кількість розкиснювачів.

Видалення шкідливих домішок – фосфору й сірки – з металу шва при ЕШЗ не відбувається в необхідному обсязі. Причиною цього є як температурні умови процесу, так і самі флюси, особливо марганцевисті, у шихту яких разом з марганцевою рудою попадають домішки (флюс АН-8). При зварюванні під такими флюсами на початкових ділянках шва спостерігається особливо підвищений перехід фосфору із флюсу в метал. Застосування марганцевистих флюсів типу АН-8 і стандартних електродних дротів не вирішує проблеми десульфурзації металу шва. Знизити вміст сірки в металі шва дозволяє використання вапняних шлаків основного типу, що містять *CaO*. При цьому проведення додаткового розкиснення шлакової ванни збільшує ефект десульфурзації металу. За необхідності підсилити процес десульфурзації збільшують змінність шлаків шляхом періодичного контакту металу з новими порціями флюсу.

На хід металургійних процесів і хімічний склад металу шва при ЕШЗ істотно впливає рід струму й полярність увімкнення, тому що шлак являє собою електроліт, що складається з іонів металу, кисню й окислів металу.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Конспект лекцій по дисципліні «Фізико-хімічні основи виробництва конструкційних металів» для студентів спеціальності 7.092301 «Технологія і обладнання зварки»/ Сост. В.И. Кабацкий. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 118 с.

Лифшиц Л.С. Металловедение и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лифшиц, А.Н. Хакимов. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.

Петров Г.Л. Теория сварочных процессов / Г.Л. Петров, А.С. Тумарев. – М.: Высш. шк., 1997. – 392 с.

Думов С.И. Технология электрической сварки плавлением/ С.И. Думов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 461 с.

Квасницький В.В. Спеціальні способи зварювання: навч. посібник/ В.В. Квасницький. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с.

Квасницький В.В. Теорія зварювальних процесів. Дослідження фізико-хімічних і металургійних процесів та здатності металів до зварювання: навч. посібник / В.В. Квасницький. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 181 с.

Косенко А.А. Металлургические основы процессов сварки плавлением и пайки: учеб. пособие: в 2-х т. /А.А. Косенко. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – Т.2. – 168 с.

Николаев Г.А. Специальные методы сварки: учеб. пособие для студентов вузов/ Г.А. Николаев, Н.А. Ольшанский. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.

Теория сварочных процессов: учеб. / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
1 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ .....	4
1.1 Загальні відомості.....	4
1.2 Принципові труднощі, що перешкоджають утворенню зварних з'єднань .....	5
1.3 Закономірності атомно-кристалічної будови металів .....	7
1.4 Сили зв'язку в твердих тілах .....	10
1.5 Фізико-механічні процеси встановлення міжатомних зв'язків у зварних з'єднаннях.....	14
2 МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПЛАВЛЕННЯМ... ..	17
2.1 Особливості металургійних процесів при зварюванні плавленням.....	18
2.2 Хімічний склад металу шва .....	19
2.3 Характеристика фаз, що утворюють зварювальну систему....	20
2.3.1 Газова фаза при зварюванні плавленням.....	21
2.3.2 Шлакова фаза при зварюванні плавленням .....	23
2.4 Взаємодія металу з газовою фазою .....	27
2.4.1 Розчинення газів у рідкому металі.....	27
2.4.2 Окиснювання металу при зварюванні .....	29
2.4.3 Взаємодія металу з азотом .....	32
2.4.4 Взаємодія металу з воднем .....	33
2.5 Взаємодія металу зі шлаковою фазою.....	35
2.5.1 Розкиснення металу при зварюванні.....	37
2.5.2 Легування металу шва при зварюванні плавленням.....	42
2.5.3 Рафінування металу шва при зварюванні плавленням.....	46
3 МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ЗАХИСТУ ЗОНИ ЗВАРЮВАННЯ.....	50



3.1	Металургійні процеси при зварюванні незахищеним електродом .....	50
3.2	Металургійні процеси при зварюванні в інертних газах .....	51
3.3	Металургійні процеси при зварюванні у вуглекислому газі .....	52
3.4	Металургійні процеси при ручному дуговому зварюванні товстопокритими електродами .....	55
3.5	Металургійні процеси при зварюванні електродами руднокислого типу .....	59
3.6	Металургійні процеси при зварюванні електродами фтористокальцієвого типу .....	60
3.7	Металургійні процеси при зварюванні рутиловими електродами.....	61
3.8	Металургійні процеси при зварюванні електродами органічного типу .....	62
3.9	Металургійні процеси при зварюванні під флюсом .....	63
3.9.1	Процеси, що відбуваються у газовій фазі .....	64
3.9.2	Процеси, що відбуваються при контакті рідкого металу з газовим середовищем .....	64
3.9.3	Процеси, що відбуваються при контакті рідкого металу з флюсом.....	65
3.10	Металургійні процеси при електрошлаковому зварюванні .....	66
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....	69

Навчальне видання

**Горлов Олександр Кузьмич  
Рогачов Євген Петрович  
Лашко Сергій Миколайович**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
ЗВАРЮВАННЯ**

**Частина 1**

Редактор В.М. Коваль

Зв.план, 2010

Підписано до друку 27.10.2010

ормат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 4. Обл.- вид. арк. 4,5. Наклад 150 прим.

Замовлення 363. Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
„Харківський авіаційний інститут”  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
<http://www.khai.edu>  
Видавничий центр „ХАІ”  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)