Алюміній за обсягами світового виробництва вийшов на друге місце після сталі, а за темпами росту далеко випередив сталь. Такий стрімкий розвиток алюмінієвої промисловості можна пояснити його позитивними властивостями і порівняно низькою вартістю.

**1. Властивості алюмінію**

***Алюміній*** - метал срібно-білого кольору, має гранецентровану кубічну ґратку з параметром *а* = 0,4041 нм; характеризується малою густиною (γ = 2700 кг/м3), низькою температурою плавлення (tп = 660 °С), високими пластичністю, тепло- та електропровідністю, доброю зварюваністю й оброблюваністю різанням. Водночас алюміній характеризується низькою міцністю та твердістю (табл. 29.1).

Таблиця 29.1 - Марки та механічні властивості первинного алюмінію

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Марка алюмінію** | **Алюміній, % не менше ніж** | **σ0.2** | **σ в** | **НВ** | **δ** |
| **МПа** |  | **%** |
| Алюміній особливої чистоти |
| А999 | 99,999 | - | 40 | 15 | - |
| Алюміній високої чистоти |
| А995 | 99,995 | - | - | - | - |
| А99 | 99,99 | 22 | 45 | 16 | 50 |
| А97 | 99,97 | - | - | - | - |
| А95 | 99,95 | - | - | - | - |
| Алюміній технічної чистоти |
| А85 | 99,85 | - | - | - | - |
| А8 | 99,8 | 25 | - | - | 45 |
| А7 | 99,7 | 50 | 60 | 18 | 38 |
| А7Е | 99,7 | - | - | - | - |
| А6 | 99,6 | - | - | - | - |
| А5 | 99,5 | 60 | 70 | 20 | 30 |
| А5Е | 99,5 | - | - | - | - |
| АО | 99,0 | 70 | 80 | 22 | 30 |

На повітрі він покривається тонкою щільною оксидною плівкою А12О3, яка надійно захищає його від корозії. Сталими домішками алюмінію є залізо, кремній, мідь, магній, марганець, цинк, титан та ін. Домішки зумовлюють погіршення фізико-хімічних властивостей і пластичності алюмінію, через що їх вміст строго обмежують. Залежно від сумарної частки домішок первинний алюміній поділяють на алюміній особливої, високої та технічної чистоти.

Алюміній особливої чистоти марок А999 містить 0,001% домішок, високої чистоти марок А995, А99, А97 і А95 - від 0,005 до 0,05 % домішок, технічної чистоти марок А85, А8, Л7, А7Е, А6, А5, А5Е і А0 - від 0,15 до 1,0 % домішок. Алюміній особливої чистоти застосовують для дослідних робіт, у напівпровідниковій і ядерній техніці.

У промисловості використовують переважно алюміній високої та технічної чистоти. З нього виготовляють головним чином сплави, а також електропроводи, кабелі, конденсатори та фольгу. Застосовувати алюміній як конструкційний матеріал недоцільно з огляду на його низьку міцність.

**Сплави алюмінію**, окрім основного металу й домішок, мають спеціально введені легувальні елементи, які змінюють структуру та властивості у бажаному напрямку. Легують алюміній міддю, магнієм, кремнієм, марганцем, цинком, літієм, нікелем і титаном. Ці елементи утворюють з алюмінієм обмежені α-тверді розчини зі змінною розчинністю другого компонента й інтерметалеві сполуки типу А12Сu (Q-фаза), Мg2Si (β-фаза), А13Мg2, А12СuМg (S-фаза), А12СuLi, А12Мg3Zn3 (Т-фаза) та ін.

Сплави алюмінію характеризуються високими механічними й технологічними властивостями, більшість із цих сплавів мають високу тепло- та електропровідність, добру корозійну тривкість. Питома міцність деяких сплавів алюмінію наближається до високоміцних сталей. Завдяки переліченим властивостям, поміркованим цінам, а також естетичному виглядові, сплави алюмінію широко застосовуються у літако-, судно- й ракетобудуванні, транспорті, будівництві та побуті.

Залежно від технології виготовлення виробів сплави алюмінію поділяють на деформовані й ливарні. Із діаграми алюмінію А1-легувальний елемент В (рис. 29.1) видно, що сплави, які перебувають лівіше від точки D*,* можуть переходити в однофазовий твердий розчин під час нагрівання. Завдяки високій пластичності ці сплави належать до деформівних Д сплавів алюмінію. Водночас деформівні сплави алюмінію поділяють на сплави 1*,* що не зміцнюються термообробкою (теоретично лежать лівіше під точки F*)* і сплави 2*,* що зміцнюються термообробкою (лежать між точками Fі D). Сплави, що не зміцнюються термообробкою, за будь-яких температур мають у твердому стані однофазову структуру.

Сплави, що перебувають правіше від точки D, крім α-твердого розчину, мають евтектику, завдяки якій підвищуються їх ливарні властивості й погіршується оброблюваність тиском.



Рисунок 29.1 - Типова діаграма стану алюміній-легувальний елемент В:

Д - деформовані сплави; Л - ливарні сплави; 1 - сплави, що не зміцнюються термообробкою; 2 - сплави, що зміцнюються термообробкою

**2. Деформівні сплави алюмінію, що не зміцнюються термічною обробкою**

**Деформівні сплави алюмінію, що не зміцнюються термообробкою**, виготовляють на основі алюмінію та марганцю або на основі алюмінію і магнію. Легувальні елементи - марганець і магній - значною мірою підвищують міцність, водночас знижуючи пластичність матеріалу. Марганець, крім цього, збільшує корозійну тривкість сплаву. Сплави алюмінію з марганцем позначають літерами АМц, а сплави алюмінію з магнієм - літерами АМг.

Структура сплаву АМц у рівноважному стані складається з α-твердого розчину та вторинних кристалів А16Мn, які з підвищенням температури переходять у твердий розчин. Наявність заліза зумовлює збільшення міцності внаслідок утворення фази А16(Мn, Fе), яка погано розчиняється в α-фазі. Магній, в свою чергу, утворює з алюмінієм α-твердий розчин і вторинні кристали А13Мn2.

Зміцнювальна обробка сплавів АМц і АМг малоефективна. Значно більший ефект дає деформування у холодному стані. Залежно від рівня зміцнення розрізняють ***напівнагартовані*** *(П)* й ***нагартовані*** *(Н)* ***сплави****.*

Сплави алюмінію, що не зміцнюються термообробкою, застосовують для виготовлення мало- та середньонавантажених виробів (резервуари для пального, трубопроводи, корпуси суден, ліфти, рами вагонів тощо).

**3. Деформівні сплави алюмінію, що зміцнюються термічною обробкою**

**Сплави алюмінію, що зміцнюються термообробкою**, це дуралюміни, авіалі, а також високоміцні, кувальні й жароміцні сплави. Вміст легувальних елементів у них перевищує їх граничну розчинність в алюмінії при кімнатній температурі, але не перевищує граничну розчинність при температурі евтектичного перетворення.

Типовими представниками сплавів, що зміцнюються термообробкою, є ***дуралюміни,*** які добре поєднують міцність і пластичність. *Марки дуралюмінів* позначають літерою Д і числом, що відповідає умовному номеру сплаву, наприклад Д16 (табл. 29.2). Головними легувальними елементами дуралюмінів є мідь і магній. Зі зниженням температури від евтектичної з α-твердого розчину виділяється хімічна сполука А12Сu (Q-фаза), твердість якої 49 НRС. Наявність магнію призводить до виділення S-фази А12СuМg твердістю 52 НRС. Зі збільшенням до певної межі концентрації магнію міцність сплаву зростає. Марганець підвищує корозійну тривкість. З метою додаткового підвищення корозійної тривкості використовують ***плакування******листів дуралюмінів***, тобто нанесення на їх поверхню тонкого шару чистого алюмінію. Кремній в дуралюмінах слід розглядати як домішку. Структура дуралюмінів у рівноважному стані складається із α-твердого розчину й різних інтерметалевих твердих фаз, серед них Q- і S-фази. Дуралюміни широко застосовують в авіації, автомобілебудуванні, будівельних конструкціях.

Таблиця 29.2 - Марки й хімічний склад деяких сплавів алюмінію, що зміцнюються термообробкою

|  |  |
| --- | --- |
| **Марка сплаву** | **Масова частка легувальних елементів, %** |
| **Сu** | **Mg** | **Мn** | **Si** | **інші елементи** |
|   | Дюралюміни |
| Д1 | 3,8...4,8 | 0,4...0,8 | 0.4...0.8 | 0,7 | - |
| Д1б | 3.8...4.9 | 1,2...1,8 | 0.3...0.9 | 0,5 | - |
| Д18 | 2.2...3.0 | 0,2...0,5 | 0,2 | 0,5 | - |
|   | Сплави авіаль |
| АВ | 0.1...0.5 | 0,45...0,9 | 0,15...0,35 | 0,5...1,2 | - |
| АД31 | 0,1 | 0.4...0.9 | 0.1 | 0,3...0,7 | - |
| АДЗЗ | 0.15...0.4 | 0,8...1,2 | 0,15 | 0,4...0,8 | - |
|   | Кувальні сплави |
| АК6 | 1,8...2,6 | 0,4...0,8 | 0,4...0,8 | 0,7...1,2 | - |
| АК8 | 3,9...4,8 | 0,4...0,8 | 0.4...1.0 | 0,6...1,2 | - |
|   | Високоміцні сплави |
| В95 | 1,4...2,0 | 1.8...2.8 | 0,2...0,6 | 0,5 | 5,0...7,0 Zn |
| В96 | 2,2...2,8 | 2,5...3,2 | 0,2...0,5 | - | 7,6...8,6 Zn |
|   | Жароміцні сплави |
| АК4-1 | 1,9...2,7 | 1,2...1,8 | 0,2 | 0,35 | 0,8...1,4 |
| АК4 | 1,9...2,5 | 1,4...1,8 | 0,2. | 0,5...1,2 | 0.8...1.3 |

Головними легувальними елементами сплавів - **авіалі -** є магній і кремній, а основною зміцнювальною фазою - β-фаза (Мg2Sі). Авіалі марок АВ, АД31 і АД33 мають високу пластичність, зварюваність і корозійну тривкість, хоч дещо поступаються за міцністю дуралюмінам. З цих сплавів виготовляють лопатки гвинтів гелікоптерів, ковані деталі двигунів, а також напівфабрикати (листи, труби тощо).

**Кувальні алюмінієві сплави** характеризуються доброю пластичністю й задовільною міцністю. Їх маркують літерами АК й умовними числами. За хімічним складом кувальні сплави близькі до дуралюмінів, хоч вміст кремнію тут вищий. Зміцнювальними фазами є Мg2Sі, А12Сu і ω-фаза, до складу якої входять А1, Сu, Мg і Sі. Гарячу обробку тиском виконують в інтервалі температур 420...470 °С. Сплав марки АК6 використовують для середньонавантажених деталей складної конфігурації, а сплав АК8 - для високонавантажених деталей.

**Високоміцні сплави алюмінію** найміцніші серед сплавів алюмінію, хоч менш пластичні від дуралюмінів. їх марки позначають літерою В - високоміцні й умовним номером (В95). Розчинність в алюмінії легувальних елементів - цинку, магнію і міді зменшується, а під час охолодження вони виділяються як інтерметалеві сполуки: фаза Т (А12Мg3Zn3), фаза М (МgZn2) і фаза S (А12СuМg). Наявність у структурі фаз Т, М і S сприяє підвищенню міцності сплавів. Найбільше впливають на міцність цинк і магній. Водночас перелічені елементи знижують пластичність і корозійну тривкість. Незначне легування марганцем і хромом зумовлює підвищення корозійної тривкості. Сплави марок В95 і В96 використовують у літакобудуванні для високонавантажених елементів конструкцій при температурах до 100 °С.

**Жароміцні сплави алюмінію** (АК4-1, АК-4 та ін.) зберігають свої механічні властивості до температури 300 °С. Порівняно з іншими сплавами алюмінію жароміцні сплави мають більшу кількість легувальних елементів. їх додатково легують такими елементами, як залізо, нікель і титан. Залізо й нікель утворюють фазу АІ9FеNi, яка у вигляді дисперсних частин, що не коагулюють, підвищує жароміцність. Ці сплави використовують для виготовлення поршнів, головок циліндрів, лопаток компресорів турбореактивних двигунів, обшивок надзвукових літаків.

**4. Ливарні сплави алюмінію**

**Ливарні сплави алюмінію** повинні добре заповнювати форму в найвужчих місцях, мати малу схильність до утворення пористості й гарячих тріщин. Стандарт поділяє ливарні сплави алюмінію на п'ять груп.

*Сплави* *першої групи*, що містять 6...13 % кремнію, називаються ***силуміни*.** Вони характеризуються високою рідкоплинністю, малою лінійною усадкою (0,9...1,2 %) й низькою схильністю до утворення тріщин. Добрі ливарні властивості зумовлені високою часткою евтектики у їх складі. Евтектична точка системи А1-Si відповідає 11,8 % Sі. До складу евтектики входять дрібні кристали α-твердого розчину й порівняно великі та крихкі кристали практично чистого кремнію β у вигляді тонких гострих пластин, що відіграють роль концентраторів напружень. Груба структура евтектики разом з великими первинними кристалами βI, що є у заевтектичних сплавах, спричинюють низьку міцність й пластичність силумінів.

До складу більшості марок силумінів, крім кремнію як основного легувального елемента, входять марганець (0,1...0,6 %), магній (0,1...0,55 %), а також титан (0,1...0,3 %). Розчиняючись в алюмінії, легувальні елементи збільшують міцність і твердість силумінів. Водночас марганець підвищує антифрикційні властивості, а титан виконує роль модифікатора. Оптимально можна поліпшити механічні властивості силумінів, здрібнюючи їх структуру. З цією метою до рідкого розчину сплаву перед його розливанням додають невелику кількість натрію у сполуках NаF + NаСl. Окрім модифікувальної дії, натрій зсуває управо евтектичну точку системи А1-Sі, внаслідок чого заевтектичні силуміни переходять у доевтектичні.

Найпоширенішими марками силумінів є АК12, АК9, АК7. Літерою А позначено, що сплав алюмінієвий, літерою К - кремній. Число після літери К показує середню масову частку кремнію в %. Силуміни використовують для виготовлення мало- й середньонавантажених литих деталей часто складної конфігурації.

*Сплави другої групи -* ***мідні силуміни***, крім алюмінію містять 4...22 % кремнію, 1...8 % міді, а також 0,2...1,3 % Мg, 0,2...0,8 % Мn і 0,1...0,3% Ті. Порівняно з силумінами вони мають трохи гірші ливарні властивості, але кращі механічні, їх марки АК5М, АК8МЗ, АК12М2МгН та ін. Числа після літер К, М, Н і Мг відповідають середній масовій частці (в %) кремнію, міді, нікелю і магнію. Коли число після літери відсутнє, масова частка елемента становить близько 1 %. З мідних силумінів виготовляють корпуси компресорів, головки та блоки циліндрів автомобільних двигунів.

*Сплави третьої групи*, основними компонентами яких є А1 і Сu, мають серед ливарних сплавів найвищу міцність (σв = 300...500 МПа) й пластичність (δ = 4...12 %). Вони легко обробляються різанням, добре зварюються, але виявляють малу корозійну тривкість й мають низькі ливарні властивості. Додаткове легування титаном і марганцем сприяє росту міцності й поліпшенню ливарних властивостей. Виділення інтерметалевих фаз А112Мn2Си і А13Ті на границях зерен твердого розчину підвищує жароміцність сплавів до 300 °С. Одним з представників третьої групи є сплав марки АМ5.

*Сплави четвертої групи -* ***магналії*** - належать до системи А1-Мg. Вони легко обробляються різанням, тривкі до корозії, задовільно міцні та пластичні, їх ливарні властивості погані. Марки сплавів четвертої групи: АМг7 (6...8 % Мg), АМг10 (9,5...10,5 % Мg), АМг5К (4,5...5,5 % Мg; 0,8...1,3 % Sі; 0,1... 0,4 % Mn). З магналіїв виготовляють деталі суден та літаків, які не бояться вологи.

У *сплавах п'ятої групи* другим за масовою часткою компонентом після алюмінію може бути кремній (К) або цинк (Ц). Марки сплавів: АК9Ц6, АК7Ц9, АЦ4Мг.

**5. Термічна обробка сплавів алюмінію**

Дуже часто, щоб змінити структуру та властивості виробів, виготовлених зі сплавів алюмінію, їх термічно обробляють. Промислові сплави алюмінію, що зміцнюються термообробкою, багатокомпонентні, а відповідні діаграми стану - надто складні. Можна розглядати структурні перетворення у багатокомпонентних сплавах за спрощеним варіантом, перейшовши від багатокомпонентних до двокомпонентних діаграм стану. Звичайно, точність опису структурних перетворень тут знижується, а деякі структури залишаються не врахованими. Щоб такого не трапилось, треба після розгляду перетворень у двокомпонентній системі внести в структуру багатокомпонентного сплаву необхідні доповнення та уточнення із урахуванням структур, яких немає в двокомпонентній системі.

У виробничій практиці та в наукових лабораторіях широко використовують такі види термічної обробки сплавів алюмінію як відпал, гартування і старіння.

*Відпалюють* вироби, в яких під час попередньої обробки сформувалась нерівноважна структура, що знижує пластичність матеріалу. Під час ***відпалу*** нерівноважна структура переходить у рівноважну. Розрізняють гомогенізаційний, рекристалізаційний і знеміцнювальний відпал.

***Гомогенізаційний відпал сплавів алюмінію*** це нагрівання сплаву алюмінію до температури дещо вищої від температури граничної розчинності інтерметалевої фази в α-твердому розчині, але нижчої від температури лінії солідус, тривале витримування при цій температурі та подальше повільне охолодження. ***Витримування*** при температурі гомогенізації сприяє повному та рівномірному розчиненню вторинних кристалів у α-фазі, оскільки висока температура значно активізує дифузійні процеси. Під час повільного охолодження з твердого α-розчину виділяються вторинні кристали порівняно великих розмірів, що рівномірно розподіляються в матриці. Гомогенізаційний відпал зменшує хімічну та структурну неоднорідність литих виробів і підвищує їх пластичність.

***Рекристалізаційний відпал сплавів алюмінію*** це нагрівання деформованих виробів до температури на 50... 150 °С вищої від температури первинної рекристалізації, витримування при цій температурі та подальше охолодження. При температурі нагрівання у зміцненій структурі зароджуються і ростуть нові недеформовані кристали. Для сплавів, що не зміцнюються термообробкою, швидкість охолодження не має істотного значення. Рекристалізаційний відпал часто застосовують між операціями холодної обробки тиском з метою підвищення пластичності зміцненого металу. Іноді цей відпал є кінцевою термообробкою для напівфабрикатів, які повинні мати порівняно невисоку міцність, але високу пластичність.

***Знеміцнювальний відпал сплавів алюмінію*** охоплює нагрівання зміцненого попередньою термообробкою сплаву до температур 350...450 °С, витримування при цих температурах та повільне охолодження. Його застосовують, якщо сплав попередньо був зміцнений гартуванням і старінням. Під час відпалу розпадається зміцнена структура і утворюється структура, близька до рівноважної.

***Гартування сплавів алюмінію*** це такий вид термічної обробки, під час якої сплав алюмінію нагрівають до температури дещо вищої від лінії граничної розчинності інтерметалевих фаз в α-твердому розчині, але нижчої від температури плавлення будь-якої фази, витримують при цій температурі, а потім охолоджують зі швидкістю не меншою за критичну. Гартують ті сплави алюмінію, розчинність зміцнювальних фаз яких у кристалах α збільшується зі зростанням температури. Важливими легувальними елементами в зміцнюваних термообробкою сплавах алюмінію є Сu, Мg, Zn або Sі, а відповідними зміцнювальними інтерметалевими фазами - Q (А12Си), S(А12СuМg), М (МgZn2), Т (А12Мg3Zn3) і β(Мg2Sі).

***Старіння сплавів алюмінію -*** такий вид термообробки, при якому пересичений твердий розчин, отриманий внаслідок гартування, розпадається шляхом дифузійного перерозподілу атомів і його структура поступово наближається до рівноважного стану. Старіння поділяють на природне і штучне залежно від температури процесу. *Природне старіння* відбувається при нормальній температурі, а *штучне* - при нагріванні до температур 100...200 °С. Структурні перетворення під час старіння залежать не тільки від температури, але й від часу витримки при цій температурі.