

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

Методичні вказівки

до виконання лабораторного практикуму з розділу
«Вивчення структури, властивостей та призначення металів і сплавів
з високою питомою міцністю (Al, Ti)»
з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів
і матеріалознавство»
для студентів усіх форм навчання

Затверджено на засіданні
кафедри матеріалознавства.
Протокол №11 від 17.06.2015

ДНІПРО ДВНЗ УДХТУ 2017

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з розділу «Вивчення структури, властивостей та призначення металів і сплавів з високою питомою міцністю (Al, Ti)» для студентів усіх форм навчання з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» / Укл.: В.В. Трофименко, В.І. Овчаренко. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 42 с.

Укладачі: В.В. Трофименко, канд. техн. наук
В.І. Овчаренко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.Б. Гірін, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з розділу «Вивчення структури, властивостей та призначення металів і сплавів з високою питомою міцністю (Al, Ti)» з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» для студентів усіх форм навчання.

Укладачі: ТРОФИМЕНКО Віталій Васильович
ОВЧАРЕНКО Володимир Іванович

Коректор О.Г. Нефедова
Комп'ютерна верстка О.Г. Нефедова

Підписано до друку 16.03.17. Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 1,83. Обл.-вид. арк. 1,92. Тираж 100 прим. Зам. № 418
Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005

Редакційно-видавничий відділ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1	
СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ	
СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ.....	5
1.1 АЛЮМІНІЙ.....	5
1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ І МАРКУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	6
1.2.1 ДЕФОРМІВНІ СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ.....	10
1.2.2 ЛИВАРНІ СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ.....	16
1.3 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ.....	21
1.4 ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	21
1.5 ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ.....	21
1.6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	21
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2	
СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ І ЗАСТОСУВАННЯ	
ТИТАНУ ТА СПЛАВІВ НА ЙОГО ОСНОВІ.....	22
2.1 ТИТАН, ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ.....	22
2.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ.....	24
2.3 ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФОРМІВНИХ І ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	
НА ОСНОВІ ТИТАНУ.....	27
2.4 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ.....	30
2.5 ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНУ І ЙОГО СПЛАВІВ	
У ХІМІЧНОМУ ТА ХАРЧОВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ.....	31
2.6 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ.....	33
2.7 ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ.....	34
2.8 ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ.....	34
2.9 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ.....	34
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	35
Додаток А.....	36
Додаток Б.....	37
Додаток В.....	40
Додаток Г.....	41
Додаток Д.....	42

ВСТУП

У промисловості і будівництві поряд із чорними металами широко застосовуються кольорові метали та сплави на їхній основі. Попри те, що сплави кольорових металів мають більшу вартість і дефіцитність, використання їх у техніці дедалі зростає. У машинобудуванні серед сплавів кольорових металів найширше застосування набули конструкційні сплави на основі легких металів – алюмінію, титану, магнію.

Основним показником високої якості кольорових металів є мінімальний вміст домішок, тобто чистота, що визначає найприродніші властивості кожного металу та їхній питомий внесок при одержанні сплавів із певними характеристиками. Властивості кольорових металів і сплавів, особливо міцнісні, в основному, залежать від технології виготовлення виробів, їхніх розмірів (масштабний фактор) і термічної обробки. Тому вони зазвичай регламентуються у стандартах і технічних умовах на конкретні вироби з кольорових металів і сплавів.

Сплави на основі легких кольорових металів – Al, Ti, Mg – характеризуються високими питомими міцністю (σ_B/γ) та жорсткістю (E/γ), що дає змогу істотно зменшити масу конструкцій за одночасного підвищення їх міцності й жорсткості.

Для порівняння в табл. 1 наведено характеристики міцності ряду кольорових сплавів, берилію та високолегованої сталі 03X18K9M5T.

Таблиця 1
Питома міцність деяких кольорових сплавів і берилію

Характеристика	Матеріали				
	MA10	B96	BT1	Be	03X18K9M5T
Тимчасовий опір σ_B , МПа	430	700	1500	680	2000
Питома міцність σ_B/γ (руйнуюча довжина), км	21	23	30	37	27

*Цифра, що отримується від ділення міцності (σ_B) на щільність (γ) є одночасно і *руйнуючою довжиною* в км; тобто дрід зі сталі H18K9MA руйнується під дією власної ваги при довжині 2,3 км, тому часто питому міцність вимірюють в км.

Як виходить з таблиці, питома міцність сплавів на основі кольорових металів є порівняною, а іноді й вищою, ніж у мартенситостаріючої сталі. Якщо врахувати високу тепло- та електропровідність, добру корозійну стійкість і технологічність більшості сплавів на основі алюмінію, титану та магнію, можливо легко пояснити їх широке застосування у техніці.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ І ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Мета роботи: вивчити мікроструктури типових сплавів на основі алюмінію; встановити взаємозв'язок між складом, структурою та властивостями цих сплавів; вивчити вплив термічної обробки на структуру та властивості алюмінієвих сплавів; освоїти принципи маркування та ознайомитися з галузями призначення.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Алюміній

Алюміній – найпоширеніший у земній корі сріблясто-білий метал з ГЦК кристалічною решіткою, не має алотропічних модифікацій. Характеризується малою густиною ($\gamma=2,72 \text{ г/см}^3$) – у три рази легший за сталь; низькою температурою плавлення ($t_{\text{пл}}=660^\circ\text{C}$). Алюміній має високу корозійну стійкість завдяки утворенню на його поверхні тонкої, але щільної і міцної оксидної плівки Al_2O_3 , що захищає його поверхню від взаємодії із середовищем. Він стійкий у морській воді, у багатьох органічних кислотах, у концентрованій азотній кислоті, у повітрі, забрудненому сірчистими газами і т. д. Стійкість алюмінію проти атмосферної корозії в ~ 20 разів більша за стійкість сталі. Однак алюміній легко руйнується під дією лугів, соляної кислоти і деяких інших мінеральних кислот.

Механічні властивості відпаленого алюмінію високої чистоти $\sigma_{\text{в}}=80\dots 100 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2}=30\dots 40 \text{ МПа}$, $\delta=35\dots 40\%$, НВ 25...30. Холодна пластична деформація підвищує $\sigma_{\text{в}}$ до 150 МПа, але знижує δ до 6%. Алюміній легко обробляється тиском, зварюється усіма видами зварювання, але його обробка різанням ускладнена, має значну ливарну усадку. Після деформування і відпалу алюміній має однорідну зернисту структуру (рис. 1,1 а). Супутні алюмінію домішки (залізо, кремній тощо) утворюють з ним різні сполуки, які виділяються на границях зерен та всередині них (рис.1,1 б). Алюміній із залізом утворює крихку інтерметалеву сполуку Al_3Fe , яка знижує його пластичність. За вмісту кремнію понад 0,05% на межах зерен алюмінію з'являються голчасті крихкі кристали кремнію сірого кольору. У випадку одночасної присутності в алюмінії та його сплавах кремнію і заліза утворюються потрібні сполуки цих металів α -(Al-Fe-Si) та β -(Al-Fe-Si) пластинчастої або голчастої форми. Склад α -фази описує формула Fe_2SiAl_8 , а β -фази – FeSiAl_5 . Шкідливий вплив заліза на механічні властивості технічного алюмінію та сплавів на його основі нейтралізують введенням невеликої кількості мангану і хрому, які утворюють фазу α -(Al, Fe, Si, Mn) з формою часточок, близькою до поліедричної.

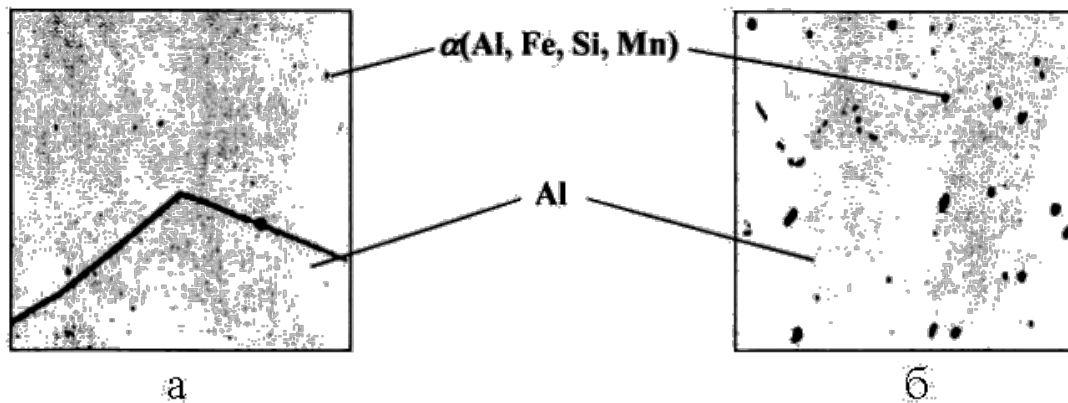


Рисунок 1.1 Мікроструктури алюмінію, х 250:

а – високочистого (99,99% Al);

б – технічного (99,5% Al, 0,2% Si, 0,3% Fe)

Постійні домішки у первинному алюмінії істотно знижують пластичність алюмінію та зумовлюють погіршення фізико-хімічних властивостей, через що їх вміст суворо обмежують. Залежно від сумарної частки домішок первинний алюміній поділяють на алюміній **особливої, високої** та **технічної чистоти**.

Алюміній **особливої чистоти** – А999 містить: Al - 99,999%, домішок - 0,001%

високої чистоти А995 – вміст Al - 99,995%, домішок - 0,005%

А99 – вміст Al - 99,99%, домішок - 0,01%

А97 – вміст Al - 99,97%, домішок - 0,03%

А95 – вміст Al - 99,95%, домішок - 0,05%

технічної чистоти А85, А8, А7, А6, А5, А0 – від 0,15% до 1,0% домішок

Крім того, виробляють технічний деформівний алюміній (АД0, АД1).

У промисловості використовують переважно алюміній високої та технічної чистоти.

В електротехнічній промисловості алюміній замінює мідь у виробництві масивних провідників, у харчовому і хімічному виробництві алюміній використовують як матеріал для обладнання, зберігання і транспортування харчових продуктів, води, азотної, оцтової кислот та ін., а також для виготовлення предметів домашнього вжитку. В металургії алюміній використовують для розкислення сталей і як домішок до сплавів, що застосовуються у машинобудуванні та інших галузях. В алюмінію низька міцність, тому як конструкційний матеріал у незміцненому стані не використовується. Міцність алюмінію підвищується наклепом. Окрім того, міцність алюмінію можливо значно підвищити легуванням, завдяки чому стає можливим використання зміцнюючої термічної обробки.

1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ І МАРКУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

У сучасній техніці як конструкційний матеріал використовують головним чином не сам алюміній, а сплави на його основі, які мають значно вищі механічні властивості. Головна перевага алюмінієвих сплавів – їх мала густина 2,5–2,8 г/см² (у сталей, чавунів, мідних сплавів $\rho=7,2-8,5$ г/см²) і висока питома

міцність (відношення тимчасового опору до густини) та здатність чинити опір інерційним і динамічним навантаженням.

Перевагою алюмінієвих сплавів є висока питома міцність (відношення границі міцності до густини) та здатність чинити опір інерційним і динамічним навантаженням. Межа міцності алюмінієвих сплавів сягає 500...700 МПа за густини не більше, ніж $2,85\text{г/см}^3$. За питомою густиною окремі алюмінієві сплави наближаються до високоміцних сталей, але поступаються їм у жорсткості (модуль Юнга сталей наближено дорівнює $2,10 \cdot 10^5$ МПа, а сплавів алюмінію – $0,71 \cdot 10^5$ МПа). Більшість алюмінієвих сплавів мають високу корозійну стійкість (за винятком сплавів з міддю), тепло- та електропровідність і добру технологічну пластичність, значне розмаїття механічних та фізичних властивостей. Сплави з особливими фізичними властивостями застосовують у приладобудуванні. Корозійностійкі сплави використовують в умовах морського і тропічного кліматів, у хімічному машинобудуванні тощо; спеціальні жароміцні сплави в умовах підвищених температур (короткочасної або тривалої дії). З антифрикційних алюмінієвих сплавів виготовляють підшипники ковзання. Добра зварюваність сплавів дає змогу отримувати нероз'ємні з'єднання високої міцності та корозійної стійкості.

За технологією виготовлення виробів розрізняють три групи алюмінієвих сплавів: **деформівні, ливарні, спечені (спеціальні)** (Додаток А).

Деформівні алюмінієві сплави здатні добре пластично деформуватися. Головними легувальними елементами таких сплавів є мідь, магній, манган, цинк, кремній, а також титан, хром, берилій, нікель, цирконій, залізо тощо. Перевагою деформівних алюмінієвих сплавів, є те, що вони не схильні до окрихчення за низьких температур.

З деформівних сплавів способом напівбезперервного лиття одержують круглі та площинні злитки, які піддають гарячій та холодній обробці тиском (пресування, прокатка, кування, штампування тощо).

Головною структурною складовою деформівних сплавів є твердий розчин на основі алюмінію, а об'ємна частина крихких інтерметалідів порівняно невелика, що забезпечує високу здатність до деформування цих сплавів.

Ливарні сплави алюмінію вирізняються підвищеною рідкоплинністю, що забезпечує виготовлення тонкостінних та складних за конфігурацією виливків, порівняно невеликою усадкою, малою схильністю до утворення гарячих тріщин. Ливарні сплави, призначені для одержання відливок фасонних виробів у піщаних формах, кокілях методом лиття під тиском та іншими способами, повинні мати високі ливарні властивості – високу рідкоплинність, опір утворенню гарячих тріщин, малу схильність до розсіяної пористості та ін. Для цього в кінці кристалізації вони повинні мати достатньо велику кількість евтектичної рідини, яка кристалізується при постійній температурі.

Для підвищення міцності більшість алюмінієвих сплавів піддають загартуванню і старінню. При нагріванні під загартування відбувається розчинення всіх або окремих надлишкових фаз, які називають фазами-зміцнювачами, а при подальшому прискоренні охолодження ці фази не встигають виділитись і фіксується пересичений твердий розчин легуючих

елементів в алюмінії. При старінні загартованого сплаву (в залежності від температури і тривалості процесу) в пересиченому твердому розчині утворюються дільниці, збагачені легуючими елементами (зони Гінье-Престона), дисперсні часточки проміжних метастабільних фаз або виділяються стабільні фази. На цих стадіях старіння через високу дисперсність продуктів розпаду мікроструктура зістареного алюмінієвого сплаву під світловим мікроскопом зазвичай така, як і у загартованого.

Промислові алюмінієві сплави є багатокомпонентними багатофазовими системами. Розшифровка фазового складу таких сплавів є зазвичай складним завданням. Для цих цілей застосовують спектральні фазові аналізатори з використанням комп'ютерної техніки.

За здатністю зміцнюватися *деформівні* та *ливарні* сплави поділяють на такі, що *зміцнюються* та такі, що *не зміцнюються* термічною обробкою.

Спечені (спеціальні) алюмінієві сплави виготовляють за спеціальними технологічними процесами порошкової та гранильної металургії. Такі матеріали мають високу жароміцність навіть близько 300...500°C, малий температурний коефіцієнт лінійного розширення, високу корозійну стійкість (Додаток Б).

Легуючі елементи, які переважно застосовують у сплавах на основі алюмінію (Cu, Mg, Si, Zn та ін.), утворюють з алюмінієм обмежені тверді розчини змінної концентрації, в яких розчинність елемента зі зниженням температури зменшується (рис. 1.2). З аналізу діаграми випливає, що всі сплави, які знаходяться лівіше за точку D, за допомогою нагрівання можна перевести в однофазний стан твердого α -розчину. Такі сплави мають високу пластичність, добре оброблюються тиском і належать до групи деформівних. Точка D відповідає найбільшій розчинності легуючого елемента в α -розчині за евтектичної температури. Тому сплави, які розміщуються правіше за точку D, мають у структурі поряд з α -розчином евтектику. Ці сплави більш крихкі, погано оброблюються тиском, але завдяки евтектиці мають високі ливарні властивості.

Деформівні сплави (лівіше за точку D), своєю чергою, поділяються на термічно незміцнювані (сплави А, які розташовані лівіше за точку F), термічно зміцнювані (сплави Б, які розташовані між точками F і D). Незміцнювані сплави (А) внаслідок нагрівання не змінюють структури, зберігаючи зерна твердого α -розчину до солідуса. Термічно зміцнювані сплави (Б) мають змінну концентрацію легуючого елемента по лінії FD, розчинність якого зменшується зі зниженням температури.

Для зміцнення сплавів на основі алюмінію застосовують гартування і старіння, а для знеміцнення й усунення нерівноважних структур і дефектів будови, підвищення пластичності – відпал (дифузійний, рекристалізаційний).

Для позначення алюмінієвих сплавів нині застосовують дві системи маркування: традиційну літерно-цифрову й нову – цифрову.

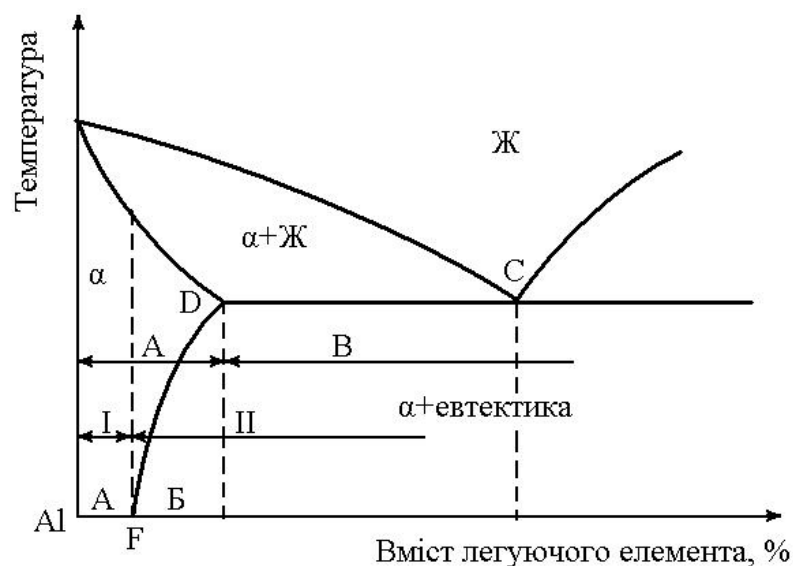


Рисунок 1.2 Области вмісту деформівних А та ливарних В сплавів:
 I – термічно незміцнювані сплави;
 II – термічно зміцнювані сплави

Літерно-цифрова система маркування передбачає позначення сплавів за такими ознаками:

- за хімічним складом, наприклад, із вмістом мангану - АМц, магнію - АМг;
- за назвою сплаву, наприклад, дуралюміній – Д1, Д6;
- за технологічним методом одержання заготовок, наприклад, алюміній кувальний – АК, ливарний – АЛ, спечений порошок (САП) або сплав (САС);
- за властивостями – високоміцний – В95, В96;
- за видом термічної і механічної обробки, наприклад, м'який відпалений – М, термооброблений – Т (Т1, Т2, ..., Т8 – вид термообробки), гартований (5...7%) – Н, напівгартований – П.

Цифрова система маркування передбачає позначення сплаву чотирма цифрами. Перша цифра 1 у всіх марках позначає алюміній, друга має головне змістове значення й умовно показує хімічний склад основи сплаву (табл. 1.1). Останні дві цифри – це порядковий номер сплаву. Наприклад, у сплаві 1510: 1 – алюміній, 5 – основна система Al-Mg; 10 – номер сплаву.

Таблиця 1.1
 Приклади позначення алюмінієвих сплавів

Хімічний склад основи	Умове позначення основи	Приклади марок	
		Літерно-цифрове позначення	Цифрове позначення
Al-Cu-Mg	1	Д1, В65	1110, 1165
Al-Cu-Mn, Al-Li	2	Д20, Д21	1220, 1221
Al-Mg-Si, Al-Mg-Si-Cu	3	АД31, АД35	1310, 1350
Al-Mn	4	АМц, АМцС	1400, 1401
Al-Mg	5	АМг1, АМг3	1510, 1530
Резервні групи	6,7,8	-	-
Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu	9	В95	1950

1.2.1 ДЕФОРМІВНІ СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ

ДЕФОРМІВНІ СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ, ЩО НЕ ЗМІЦНЮЮТЬСЯ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

До них належать технічний алюміній, сплави на основі системи Al-Mn і на основі системи Al-Mg (Додаток В, табл. В.1). Марки технічного алюмінію АД00 (99,7% Al), АД0 (99,5% Al), АД1 (99,3% Al).

Належних механічних властивостей сплавам надають за рахунок легування манганом та магнієм, а також, меншою мірою, внаслідок утворення часточок надлишкових вторинних фаз та інтерметалевих сполук. Додаткове зміцнення сплавів отримують пластичним деформуванням у холодному стані, проте застосування наклепу обмежує помітне зменшення пластичності, і тим більше, чим більший ступінь деформації. Вироби з деформівних сплавів постачають у відпаленому, напівнаклепаному ($\epsilon=10\ldots40\%$) або наклепаному станах ($\epsilon=80\%$).

Небажана втрата пластичності ускладнює проведення технологічних операцій обробки сплавів тиском, тому з метою повернення пластичності застосовують відпал.

Сплави алюмінію з манганом (АМц), що містять 1,0...1,6% Mn, мають вищу за чистий алюміній міцність ($\sigma_B=130\ldots220$ МПа) та високу пластичність ($\delta=10\ldots23\%$), підвищену корозійну стійкість та добру зварюваність, але вони незадовільно обробляються різанням.

Манган утворює з алюмінієм твердий розчин та сполуку Al_6Mn . Сплави помітно не зміцнюються гартуванням та старінням внаслідок незначного зменшення розчинності мангану в алюмінії за умови зниження температури та через недостатній ступінь дисперсності Al_6Mn . За наявності у сплаві невеликої кількості заліза утворюється практично нерозчинна у твердому стані фаза $Al_6(Mn,Fe)$, яка має форму пластинчастих кристалів. Такі часточки зменшують міцність сплавів та здатність пластично деформуватися.

Мікроструктура сплаву АМц (1,0...1,6% Mn; не більше 0,7% Fe; 0,6% Si; 0,2% Cu; 0,2% Ti; 0,1% Zn; 0,05% Mg; решта Al) після холодного пластичного деформування і відпалу складається з твердого розчину, у якому розташовані часточки Al_6Mn та $Al_6(Mn,Fe)$ (рис. 1.3, а).

Сплави алюмінію з магнієм (магналії) (АМг) містять до 6% Mg та у невеликих кількостях манган (0,2...0,8%), цирконій (0,08...0,10%), титан (0,02...0,10%), ванадій (0,02...0,15%), берилій (0,002...0,010%), а також до 0,5% Fe; 0,5% Si; 0,2% Cu; 0,2% Zn; решта Al. Міцність сплавів зростає зі збільшенням концентрації магнію ($\sigma_B=190\ldots300$ МПа), але пластичність мало залежить від його вмісту ($\delta=15\ldots23\%$). Сплави корозійностійкі, характеризуються високим опором втомі, добре зварюються, але погано обробляються різанням.

Промислові сплави на основі системи Al-Mg у рівноважному стані мають двофазну структуру, що складається з α -твердого розчину та фази β (Al_3Mg_2). Проте внаслідок малої швидкості дифузії магнію в алюмінії вторинна β -фаза в

сплавах за вмісту до 6% Mg не виділяється навіть під час повільного охолодження. За наявності мангану, заліза та кремнію утворюються фази, що містять ці хімічні елементи (Al_6Mn , AlMg_2Mn , Fe_2SiAl_8 тощо), а також силіцид магнію (Mg_2Si).

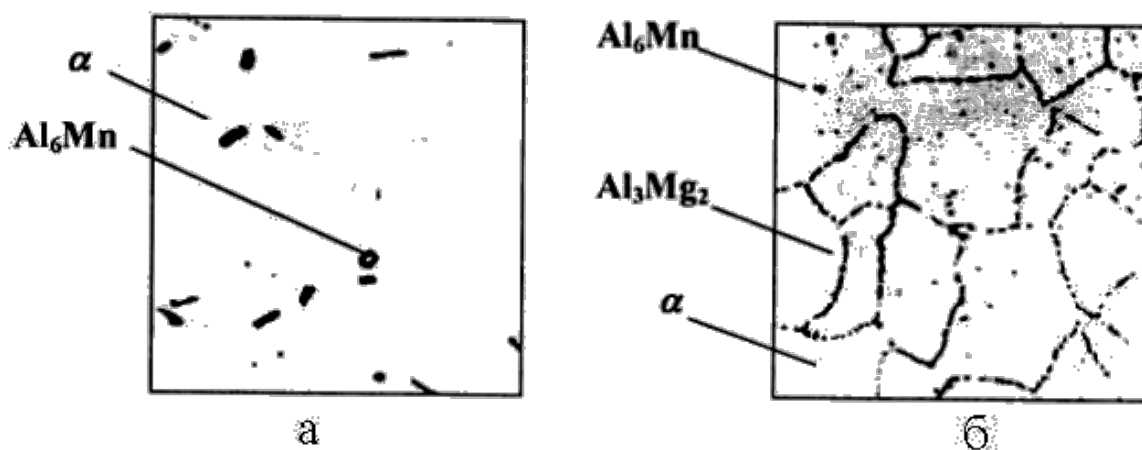


Рисунок 1.3 Мікроструктура відпалених сплавів:
а – АМц, х250; б – АМг5, х250

Кожний легувальний елемент відіграє певну роль у формуванні структури та властивостей магнеліїв. Титан подрібнює зерна твердого розчину, що підвищує міцність та в'язкість сплавів і зменшує їх схильність до утворення тріщин під час зварювання. Манган утворює з алюмінієм дисперсні часточки Al_6Mn , які сповільнюють процес рекристалізації. Цирконій інтенсивніше за манган та хром підвищує температурний поріг рекристалізації і тим самим дає можливість досягти значного зміцнення магнеліїв. Берилій очищує сплав від оксидів і посилює захисну дію оксидної плівки.

Переважну частину продукції зі сплавів на основі системи Al-Mg постачають у відпаленому стані. Підвищення міцності зі зменшенням пластичності одержують у напівнаклепаному стані ($\varepsilon=20\ldots30\%$). Мікроструктура відпаленого сплаву АМг5 (4,8...5,8% Mg; 0,5...0,8% Mn; 0,02...0,10% Ti; 0,002...0,005% Be; не більше 0,5% Fe; 0,5% Si; 0,1% Cu; 0,2% Zn; решта Al) складається з α -твердого розчину та фаз Al_3Mg_2 і Al_6Mn (рис. 1.3, б).

ДЕФОРМІВНІ СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ, ЩО ЗМІЦНЮЮТЬСЯ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

До деформівних сплавів, які зміцнюються термічною обробкою, належать складні алюмінієві сплави на основі потрійних і багатокомпонентних систем (Додаток В, табл. В.1):

- дуралюміни Д1, Д16, Д18, В65;
- авіалі (авіаційний алюміній) – сплави підвищеної пластичності та корозійної стійкості АВ, АД31, АД33, АД35;
- високоміцні сплави (В95, В94);
- сплави для кування та штампування АК6, АК8;

- жароміцні сплави АК4, АК4-1;
- зварювані 1915, 1925.

Зміцнення деформівних сплавів термічною обробкою забезпечується як за рахунок легування алюмінію, так і внаслідок розпаду пересиченого твердого розчину. Термічна обробка сплавів полягає у гартуванні та старінні (природному або штучному). Додаткове зміцнення (з втратою пластичності) проводять наклепом у холодному стані між гартуванням та старінням або після старіння.

Дуралюміни є сплавами потрійної системи Al-Cu-Mg, до яких додають манган з метою підвищення опору корозії і знешкодження негативного впливу заліза та кремнію. Залежно від марки сплави містять 3,8...4,9% Cu; 0,4...2,6% Mg; 0,3...0,9% Mn. Шкідливими домішками в дуралюмінах є Fe і Si (не більше 0,3...0,8% кожного). Окрім цих елементів, сплави можуть містити до 0,1% Ni; 0,1% Ti; 0,1...0,3% Zn. Сплави поєднують високу міцність із задовільними пластичністю, зварюваністю, оброблюваністю різанням та корозійною стійкістю.

У відпаленому стані структура більшості дуралюмінів складається з α -твердого розчину компонентів сплаву в алюмінії, розчинних під час нагрівання в твердому розчині інтерметалевих сполук CuAl_2 (θ -фаза) і Al_2MgCu (S-фаза) і нерозчинних фаз. Фази θ та S зміцнюють сплави завдяки високим твердості та міцності. Зі зростанням вмісту магнію кількість θ -фази зменшується, а кількість S-фази зростає. Сплави з 4...5% Cu і 1,5...2,0% Mg практично містять тільки S-фазу, яка є основним їх зміцнювачем.

Нерозчинними в твердому розчині сполуками, утворення яких можна очікувати в дуралюмінах різного складу, є $\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, AlMgMn , Fe_2SiAl_8 , FeSiAl_5 , α -(Al,Fe,Si,Mn) тощо. Вони знижують їх пластичність та в'язкість. Домішки заліза, кремнію і мангану, що входять до твердого розчину або утворюють нерозчинні в твердому стані сполуки, істотно не впливають на фазові перетворення під час термічної обробки. Легування сплавів манганом незначно послаблює шкідливий вплив домішок заліза та кремнію на властивості дуралюмінів. Проте ефективнішим способом підвищення їх пластичності та в'язкості вважають зменшення вмісту цих елементів до 0,1...0,3% кожного.

Найпоширенішим зі сплавів цієї групи є Д16 (3,8...4,9% Cu, 1,2...1,8% Mg, 0,3...0,9% Mn, не більше 0,5% Fe, 0,5% Si, 0,1% Ni, 0,1% Ti, 0,3% Zn, решта Al). Мікроструктура сплаву в литому стані показана на рис. 1.4, а. У структурі, окрім світлих зерен твердого розчину на основі алюмінію, бачимо світлі включення Al_2Cu і темніші Al_2CuMg ; обидві фази розташовуються на межах зерен твердого розчину. Крім них, у сплаві в невеликій кількості присутні й інші фази, які не виявляють за малих збільшень.

Структура деформованого та відпаленого дуралюміну також складається з твердого розчину з великими часточками зміцнювальних фаз і дрібнішими виділеннями нерозчинних в твердому стані сполук (рис. 1.4, б). Відпаленому сплаву властива мала міцність ($\sigma_B=220$ МПа, $\sigma_{0,2}=100$ МПа), але висока пластичність ($\delta=13\%$, $\psi=30\%$).

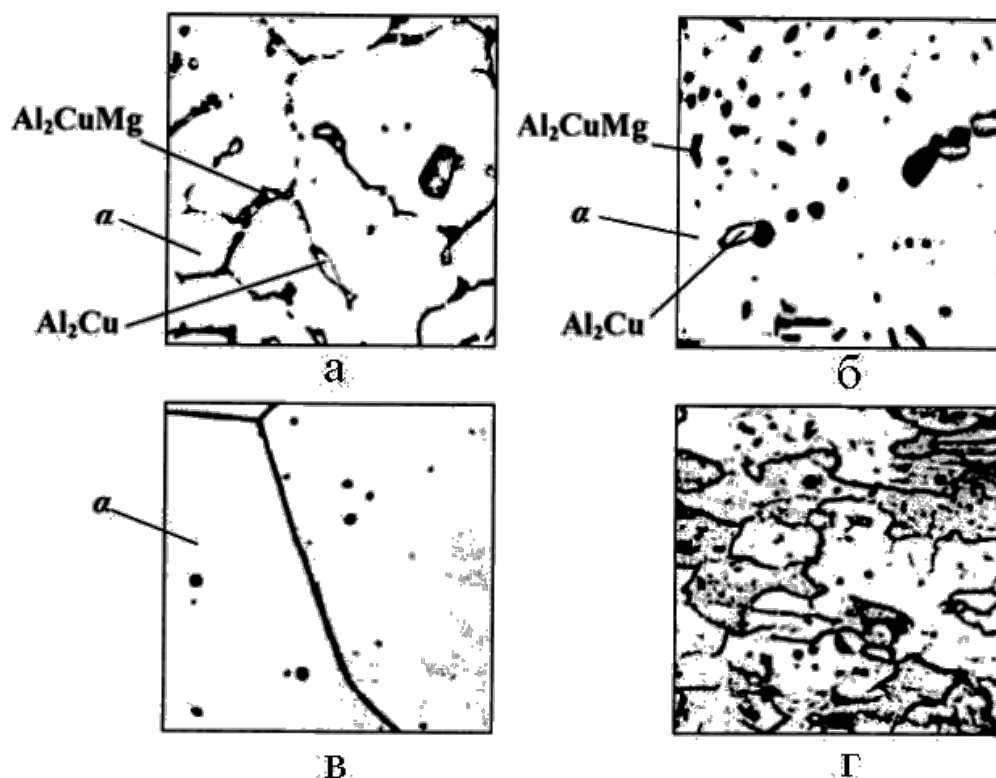


Рисунок 1.4 Мікроструктура дуралюмінію Д16
а – литого, x150; б – деформованого та відпаленого, x1000;
в – загартованого, x500; г – деформованого та зістареного, x200

Після гартування (для Д16 від 495...505°C) дуралюмініни мають структуру пересиченого σ -твердого розчину і фаз, що не розчинилися в ньому під час нагрівання (рис. 1.4, в). За рахунок пересичення твердого розчину міцність напівфабрикатів дещо зростає ($\sigma_B=430$ МПа, $\sigma_{0,2}=230$ МПа), а пластичність зменшується ($\delta=13\%$, $\psi=15\%$).

Природне старіння викликає перерозподіл компонентів твердого розчину, який супроводжується утворенням на кристалографічних площинах $\{100\}$ алюмінію, збагачених міддю зон Гінґе-Престона діаметром 1...10 нм та товщиною 0,5...1,0 нм.

Структура дуралюмініу після гартування та *штучного старіння* (за 185...195°C упродовж 6...13 год) складається з α -твердого розчину, дуже тонких пластинок або дисків проміжної фази θ' (діаметром 20...30 нм) і часточок нерозчинних фаз.

Зміцнення сплавів після природного та штучного старіння зумовлене тим, що зони Гінґе-Престона та часточки інтерметалевих фаз гальмують дислокації. Загартовані та природно зістарені напівфабрикати (профілі, листи тощо) з Д16 мають $\sigma_B=440...520$ МПа, $\sigma_{0,2}=290...380$ МПа, $\delta=11...18\%$, $\psi=15\%$

Оптична мікроскопія не виявляє будь-яких фазових змін в структурі природно і штучно зістарених дуралюмінів порівняно зі структурою загартованого сплаву (рис. 1.4, г). Часточки фази θ' можна побачити тільки в електронному мікроскопі або виявити рентгенографічно. Дисперсні частинки фази θ в структурі перевареного дуралюмініу (температура старіння понад

200°C) мають достатньо великі розміри, щоб їх можна було виявити за допомогою оптичного мікроскопа, застосовуючи максимальні збільшення (1000...2000 разів). Перестарювання викликає втрату міцності сплавом.

Авіалі умовно вважають потрійними сплавами системи Al-Mg-Si (0,4...1,4% Mg; 0,3...1,2% Si), оскільки мідь, манган та хром додають у невеликій кількості (0...0,6% Cu; 0...0,5% Mn; 0,15...0,35% Cr). Авіалі мають високу пластичність у нагрітому та відпаленому станах; після гартування та старіння вона дещо знижується. Сплави добре зварюються, вирізняються підвищеним опором корозії. Здатність оброблятися різанням після гартування та старіння – задовільна.

Основною зміцнювальною фазою авіалів є Mg_2Si . Крім неї, менш значний приріст міцності дають часточки Al_2Cu та Al_6Mn . Природне старіння в авіалях проходить дуже повільно (упродовж 240...360 год.). Переважно після гартування від 515...530°C проводять штучне старіння сплавів за 150...170°C тривалістю до 12 год. Сплави мають такі механічні властивості: $\sigma_B=320$ МПа, $\sigma_{0,2}=210$ МПа, $\delta=16\%$, $\psi=20\%$.

Мікроструктура штучно зістареного сплаву АВ (0,2...0,6% Cu; 0,45...0,9% Mg; 0,5...0,12% Si; 0,15...0,35% Mn; не більше 0,5% Fe та 0,2% Zn; решта Al) складається із зерен α -твердого розчину і часточок Mg_2Si , які розподіляються як в тілі зерен, так і на їх межах (рис. 1.5, а). Мікроструктура відпаленого сплаву відрізняється від попередньої більшими розмірами часточок фази Mg_2Si .

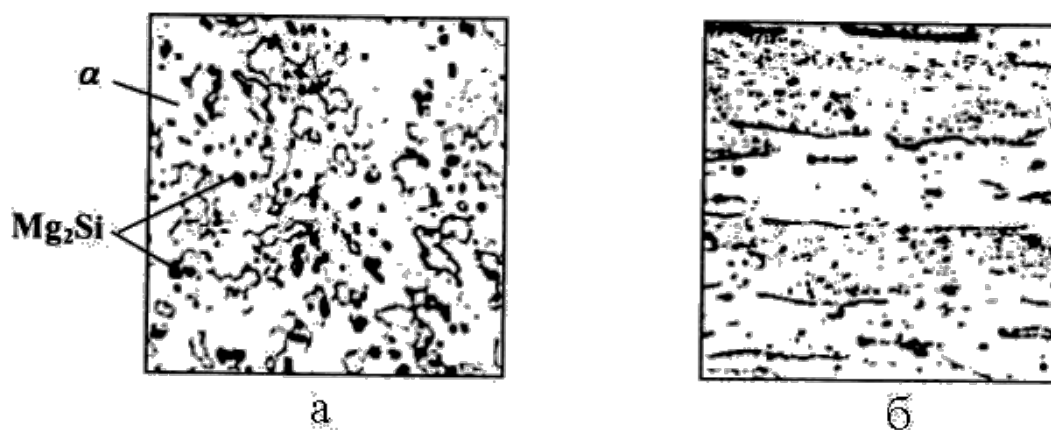


Рисунок 1.5 Мікроструктура сплавів після штучного старіння:
а – сплав АВ, х500; б – сплав В95, х500

Високоміцні сплави системи Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu мають найвищу міцність серед сплавів на основі алюмінію. Різні сплави цієї групи містять 0,1...2,8% Cu; 1,2...3,2% Mg; 0,2...0,6% Mn; 0,2...8,0% Zn; до 0,08% Ti та 0,25% Cr кожного; не більше 0,7% Fe; 0,7% Si; решта Al. Найбільш використовуваним сплавом є В95 (1,4...2,0% Cu; 1,8...2,8% Mg; 5,0...7,0% Zn; 0,2...0,6% Mn; 0,10...0,25% Cr; не більше 0,5% Fe; 0,5% Si; решта Al). Мікроструктура загартованого від 480°C і штучно зістареного сплаву (за 120°C, витримка 24 год) складається з α -твердого розчину і часточок зміцнювальних фаз Al_2CuMg , $MgZn_2$ та $Al_2Mg_3Zn_3$, які важко металографічно відрізнити одну

від одної через однаковий колір після травлення (рис. 1.5, б).

Значного підвищення опору крихкому руйнуванню та зменшення схильності до корозійного розтріскування високоміцних сплавів досягли за рахунок зменшення вмісту в них заліза та кремнію. Сплави підвищеної чистоти та особливо чисті за високої міцності (σ_B до 650...670 МПа, $\sigma_{0,2}$ до 630 МПа) є досить пластичними ($\delta=8\ldots12\%$), вони мають добрі ливарні властивості. Цього типу високоміцні сплави використовують для виготовлення корпусів ракет, обшивок крил, шпангоутів фюзеляжів літаків.

Сплави для кування та штампування відрізняються від авіалів підвищеним вмістом міді та мангану (1,8...4,8% Cu; 0,4...1,0% Mg; 0,4...1,0% Mn; 0,6...1,2% Si; до 0,2 % Cr та до 0,1% Ti; решта Al). Додавання міді збільшує межу міцності та особливо межу текучості зі збереженням належної пластичності. Манган сприяє подрібненню зерен після деформування і рекристалізації та забезпечує зміцнювальну дію під час гартування (від 495...510°C). Особливістю сплавів є підвищені ливарні властивості та висока пластичність у гарячому стані. З них легко одержувати великі виливки, а потім виготовляти поковки та штамповки великої маси (1,0...1,5 т) та складної форми.

Основними зміцнювальними фазами сплавів на відміну від дуралюмініїв є Mg_2Si та Al_2Cu . Фаза S присутня у малій кількості і питомого впливу на зміцнення сплавів не має. Найбільшого зміцнення сплавів для кування та штампування досягають гартуванням та штучним старінням за 150...165°C упродовж 12...15 год. ($\sigma_B=480$ МПа, $\sigma_{0,2}=380$ МПа, $\delta=10\%$, $\psi=25\%$). Мікроструктура сплаву АК8 після гартування від 510°C та штучного старіння за 150°C 12 год. показана на рис. 1.6, а. Усередині та на границях зерен α -фази розташовуються включення зміцнювальних фаз Mg_2Si та Al_2Cu .

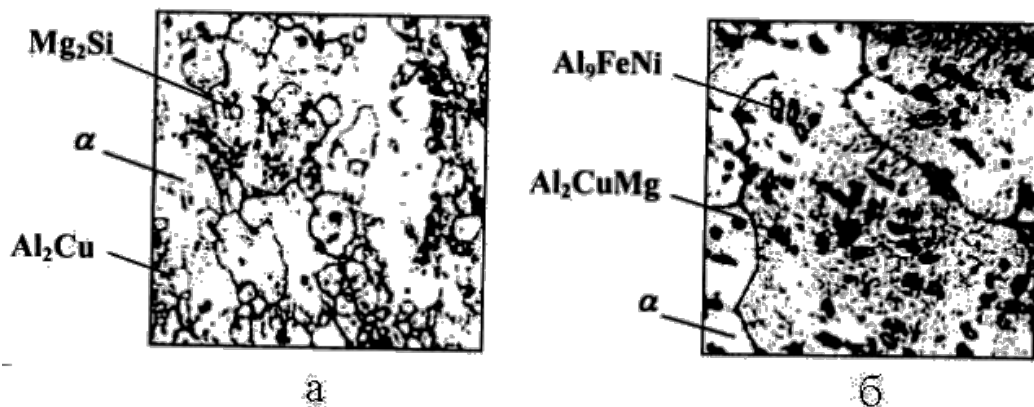


Рисунок 1.6 Мікроструктура сплавів після штучного старіння:
а – сплав АК8, x250; б – сплав АК4-1, x500

Недоліком високоміцних сплавів є схильність до корозії під напруженням, чутливість до наявності концентраторів напружень та недостатня жароміцність.

Зварювальні сплави системи Al-Zn-Mg задовільно зварюються аргонно-дуговим зварюванням, мають достатню міцність при кімнатній і криогенних температурах та високу пластичність у гарячому стані, мають задовільну корозійну стійкість.

Жароміцні деформівні сплави застосовують для виготовлення деталей машин та елементів конструкцій, які тривалий час або короткочасно працюють за підвищених температур (200...300°C і навіть 350°C). Вони переважно є складнолегованими і на відміну від інших алюмінієвих сплавів містять більшу кількість легувальних елементів, таких як залізо, нікель, манган, титан. Висока жароміцність цих сплавів, передусім, обумовлена наявністю у їх фазовому складі міцних та твердих фаз (ферумнікелевої, манганової, титанової тощо) і слабким їх знеміцненням зі зростанням температури. Окрім того, ферумнікелева та манганова фази майже не розчиняються у твердому розчині і забезпечують високий опір повзучості.

За механічними та технологічними властивостями найкращим жароміцним деформівним алюмінієвим сплавом є АК4-1 (1,9...2,5% Cu; 1,4...1,8% Mg; 0,35% Si; 0,8...1,3% Ni; 0,8...1,3% Fe; 0,02...0,10% Ti; не більше 0,2% Mn; 0,3% Zn; решта Al). Особливістю сплаву є малий і регламентований вміст кремнію, а також наявність у складі титану. Обмеження вмісту кремнію порівняно з іншими сплавами цієї групи звужує інтервал кристалізації і зменшує імовірність утворення грубих скупчень нерозчинної сполуки Al_9FeNi , яка додатково зміцнює сплав, але водночас й окрихчує його. З пониженням вмісту кремнію у сплаві також не утворюється сполука Mg_2Si , яка погіршує його пластичність і викликає зменшення кількості основної зміцнювальної фази S. Титан є модифікатором, він сприяє одержанню дрібнозернистої структури сплаву і зменшує ступінь анізотропії механічних властивостей у кованках. Зменшення вмісту мангану забезпечує повніше проходження процесу рекристалізації під час гарячого пластичного деформування.

Мікроструктура сплаву після гартування від 530°C та старіння за 190°C упродовж 12 год. зображена на рис. 1.6, б. Вона складається з твердого розчину на основі алюмінію, темних часточок фази S(Al_2CuMg) та сірих включень сполуки Al_9FeNi . Після такої обробки напівфабрикати мають ($\sigma_B=430$ МПа, $\sigma_{0,2}=280$ МПа, $\delta=13\%$, $\psi=26\%$).

Сплави з літієм систем Al-Li-Mg, Al-Li-Cu-Mg та Al-Li-Cu мають малу густину (2,47...2,63 г/см³) та досить високий модуль пружності (до 80...97 ГПа), тому їх застосовують в аерокосмічній техніці. Серед інших алюмінієвих сплавів вони вирізняються високою корозійною стійкістю, доброю зварюваністю, малою швидкістю поширення тріщин утоми. Використання цих сплавів замість Д16 дає можливість зменшувати масу окремих елементів конструкцій літаків на 16...24%.

1.2.2 Ливарні сплави алюмінію

Область розташування ливарних сплавів позначена літерою В на рис. 1.2. Більшість ливарних сплавів доєвтектичні, тому у стані після лиття вони мають дві головні структурні складові первинні кристали розчину на базі Алюмінію та евтектику.

До ливарних належать сплави, поділені за стандартом на п'ять груп: Al-Mg, Al-Si, Al-Cu, Al-Cu-Si, Al - інші хімічні елементи (у тому числі нікель,

цинк, залізо).

Сплави на основі системи Al-Mg (4,5...13,0% Mg) – ливарні магналії (АМг4К1; АМг5К; АМг10) мають високу корозійну стійкість, велику питому міцність та ударну в'язкість, добре обробляються різанням. Їх недоліком є мала герметичність та низькі ливарні властивості.

Основною зміцнювальною фазою є Al_3Mg_2 . Сплави нагрівають під гартування до $430 \pm 5^\circ C$ упродовж 12...20 год. і з метою зменшення внутрішніх напружень у виливках охолоджують в олії, нагрітій до температури $40...100^\circ C$. Сплави системи Al-Mg використовують для виготовлення деталей машин, які працюють за температур близько $80^\circ C$, оскільки за вищих температур вони швидко знеміцнюються внаслідок огрублення часточок Al_3Mg_2 . Високий ступінь пересичення твердого розчину магнієм після гартування посилює схильність сплавів типу магналіїв до утворення тріщин за тривалої експлуатації або навіть зберігання. Тріщини виникають під дією підвищених внутрішніх напружень термічного або механічного походження. Окрім того, високі внутрішні напруження сприяють природному старінню, що може тривати декілька років. Чим інтенсивніший процес старіння, тим більшою є схильність сплавів до розтріскування та корозії під напруженням. Одним із засобів підвищення експлуатаційної надійності деталей машин та елементів конструкцій є обмеження вмісту магнію: бажано, щоб його масова частка у сплавах не перевищувала 10%.

У литому стані часточки Al_3Mg_2 розташовуються на межах зерен α -фази і відіграють роль концентраторів напружень. Більшість сплавів Al-Mg застосовують у стані з гомогенною структурою α -твердого розчину, одержуваною гартуванням. Такою термічною обробкою запобігають виділенню крихкої фази Al_3Mg_2 .

Мікроструктура литого сплаву АМг10 (9,5...10,5% Mg; 0,05...0,20% Zn; 0,02...0,10% Be; 0,05...0,15% Ti; Fe не більше 0,2%; загальний вміст домішок не більше 0,6%; решта Al) показана на **рис. 1.7**. На межах зерен α -твердого розчину розташовуються включення фази Al_3Mg_2 темного кольору, і за наявності заліза та кремнію – феруммістких фаз та Mg_2Si . Структура загартованого сплаву складається з α -твердого розчину і часточок нерозчинних фаз на межах зерен.

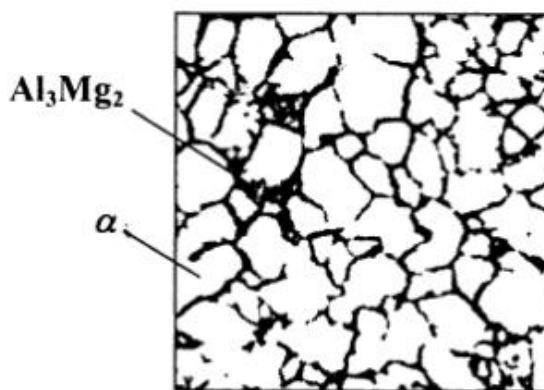


Рисунок 1.7 Мікроструктура сплаву АМг10 у литому стані, x100

Безкремністі сплави Al-Mg легують титаном (0,05...0,15%), берилієм або цирконієм (0,02...0,20%). Додавання мангану (0,4..1,0%) дещо зменшує швидкість розпаду пересиченого твердого розчину.

Сплави Al-Mg з вмістом кремнію 0,5...1,3% мають кращі ливарні властивості, ніж інші сплави цієї групи: більшу рідкоплинність, меншу схильність до утворення гарячих тріщин, підвищену густину виливків. Підвищення ливарних властивостей сплавів пов'язують з наявністю силіциду магнію у складі потрійної евтектики $\alpha + \beta(\text{Al}_3\text{Mg}_2) + \text{Mg}_2\text{Si}$. Проте Mg_2Si має павукоподібну форму і тому зменшує пластичність; саме це є причиною обмеження вмісту кремнію у сплавах до 1,5%.

Зі сплавів Al-Mg виготовляють литі деталі машин, які працюють в умовах підвищеної вологості, у судно- та літакобудуванні.

Сплави на основі системи Al-Si (6...13% Si), які називають силумінами (AK12, AK13, AK9, AK8, AK7, AK21M2 та ін.), вирізняються високою рідкоплинністю, малими лінійною усадкою (0,9...1,2%) та схильністю до утворення гарячих тріщин. Такі високі ливарні властивості стають можливими завдяки великій кількості у сплавах подвійної евтектики (40...75%), до складу якої входять кристали α -твердого розчину та часточки практично чистого кремнію (β -фаза). Зі збільшенням кількості евтектики зростає ступінь герметичності виливків. Перевагою сплавів Al-Si є також їх підвищена корозійна стійкість. Недоліки сплавів – наявність газової шпаристості та низька жаростійкість.

До складу більшості марок силумінів, окрім кремнію як основного легувального елементу, входять манган (0,2...0,6%), магній (0,2...0,55%) та титан (0,1...0,3%), які збільшують їх міцність. Окрім того манган підвищує антифрикційні властивості, а титан є модифікатором, який подрібнює структуру.

Зі збільшенням вмісту кремнію кристали β -фази гострокутної форми у структурі евтектики стають усе грубішими, що зменшує міцність та пластичність сплавів, окрихчує їх і погіршує здатність оброблятися різанням. У структурі заевтектичних сплавів з вмістом понад 13% Si утворюються грубі тверді кристали кремнію, що виділяються під час кристалізації до початку утворення евтектики. Наявність кристалів первинного кремнію негативно позначається на механічних та технологічних властивостях, оскільки вони є концентраторами напружень.

Для подрібнення структури евтектики, підвищення механічних властивостей і поліпшення здатності оброблятися різанням сплави, що містять понад 6% Si, перед розливанням модифікують натрієм, який входить до складу фторхлоридних солей ($\text{NaF} + \text{NaCl}$). За оптимального вмісту натрію (0,01...0,003%) у доевтектичних сплавах (до 11,8% Si) β -фаза кристалізується у вигляді дрібних часточок округлої форми, що й підвищує механічні та технологічні властивості сплавів. Висококремністі сплави з метою подрібнення первинних кристалів β -фази та її часточок у складі евтектики модифікують також одночасним додаванням (0,05...0,008%) сірки та фосфору.

Мікроструктури сплаву AK12 (10,0-13,0% Si; найбільший сумарний вміст

домішок у виливках, одержаних литтям під тиском, до 2,8% у тому числі Fe не більше 1,5%; решта Al) зображені на рис. 1.8. Унаслідок модифікування евтектика подрібнюється і утворюються дендрити α -твердого розчину (рис. 1.8, а,б).



Рисунок 1.8 Мікроструктура сплаву АК12:
а – немодифікований, x200;
б – модифікований фосфором та сіркою, x 150

Силуміни застосовують для виготовлення виробів, які працюють у вологих середовищах та морському кліматі. Виливки одержують литтям у піщані та оболонкові форми, кокіль, під тиском та за витоплюваними моделями.

Сплави на основі системи Al-Cu (до 6% Cu) зміцнюють термічною обробкою. Порівняно з іншими ливарними алюмінієвими сплавами вони відзначаються особливо високою межею міцності ($\sigma_B=330-430$ МПа), яку виливкам після лиття в кокіль надають гартуванням від 510...530°C та штучним старінням за 150...175°C. Сплави мають підвищену жароміцність, добре обробляються різанням та зварюються. Недоліками їх є гірші від інших сплавів цього типу ливарні властивості, недостатні герметичність, корозійна стійкість та підвищена схильність до утворення гарячих тріщин. Сплавам на основі системи Al-Cu властивий широкий температурний інтервал кристалізації та велика лінійна усадка (1,35%), тому їх не використовують для виготовлення деталей складної конфігурації. Сплави системи Al-Cu застосовують для відливання невеликих деталей нескладної конфігурації (арматура, кронштейни тощо), які експлуатують за середніх навантажень і температур до 200°C.

Висока міцність сплавів обумовлена значною розчинністю міді в алюмінії (до 5,7%). Подвійні сплави Al-Cu застосовують тільки у загартованому стані, оскільки за наявності великої відносної кількості іншої фази вони є крихкими. Підвищена крихкість пов'язана з виділенням на межах зерен відносно грубих часточок крихкої фази Al_2Cu , а за наявності заліза ще й Al_7Cu_2Fe . Утворення Al_7Cu_2Fe викликає також знеміцнення сплавів, оскільки зменшується вміст міді у твердому розчині.

Мікроструктура сплаву AM5 (4,5...5,3% Cu; 0,6...1,0% Mn; 0,15...0,35% Ti; загальний вміст домішок при литті у піщані та оболонкові форми до 1,0% у

тому числі Fe до 0,3%; решта Al) зображена на рис. 1.9. У структурі на фоні α -фази видно включення Al_2Cu , $\text{Al}_2\text{Mn}_2\text{Cu}$, Al_3Ti , а за наявності заліза – $\alpha(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Si}, \text{Mn})$.

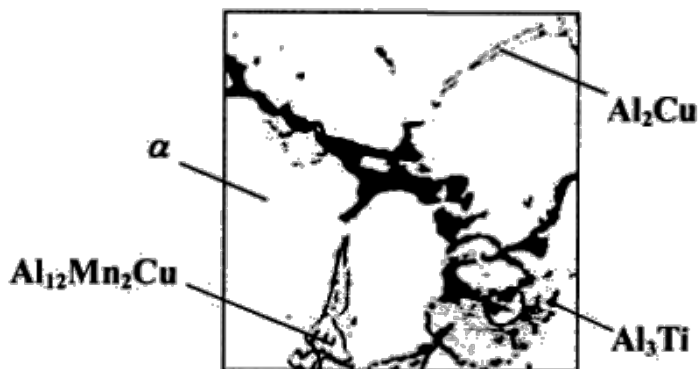


Рисунок 1.9 Мікроструктура сплаву AM5, x250.

Додаткове легування титаном та манганом зміцнює сплави і поліпшує їх ливарні властивості. Виділення фаз $\text{Al}_2\text{Mn}_2\text{Cu}$ та Al_3Ti на межах зерен твердого розчину підвищує жароміцність сплавів до 300°C . Такі сплави використовують для виготовлення деталей, які працюють в умовах підвищених статичних та динамічних навантажень.

Мідні силуміни разом з алюмінієм містять 4...22% Si; 1...8% Cu; 0,2...1,3% Mg; 0,2...0,8% Mn; 0,1...0,3% Ti. Порівняно з простими силумінами вони мають кращі механічні властивості, але дещо гірші ливарні. З мідних силумінів виготовляють корпуси компресорів, головки та блоки циліндрів автомобільних двигунів.

Серед мідних силумінів сплав АК8М (7,5...9,0% Si; 1,0...1,5% Cu; 0,5% Mg; 0,2...0,5% Mn; 0,3% Ti; домішок Fe не більше 0,9%; решта Al) зміцнюється гартуванням та штучним старінням. Причиною цього є змінна розчинність міді та магнію в алюмінії. Сплав має добру зварюваність і корозійну стійкість.

Сплави на основі систем Al – інші компоненти, крім основного елемента, можуть містити кремній (6...10%) або цинк (0,1...12,0%). Підвищення міцності сплавів досягають за рахунок легування твердого розчину цинком. Структура сплавів цієї групи мало відрізняється від структури звичайних силумінів за аналогічного вмісту кремнію. Окремі сплави за рахунок малої критичної швидкості гартування мають здатність самогартуватися, тому з них виготовляють об'ємні деталі із застосуванням зварювання, оскільки зварний шов має такі самі властивості, як литий виріб.

Ливарні алюмінієві сплави цієї групи переважно застосовують як жароміцні з максимальною робочою температурою близько 300°C для виготовлення деталей автомобілів та тракторів.

1.3 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

Мікроскопи металографічні МИМ-7, набори мікрошліфів деформівних та ливарних алюмінієвих сплавів у різному структурному стані, атлас мікроструктур, державні стандарти.

1.4 ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Отримайте набір протравлених мікрошліфів алюмінієвих сплавів відомих марок.
2. Розгляньте мікроструктури зразків за збільшення у 100...500 разів та схематично їх зобразіть.
3. За атласом визначте структурні та фазові складові у мікроструктурі кожного сплаву.
4. За маркою сплаву розшифруйте його хімічний склад, класифікуйте за структурою та призначенням, охарактеризуйте властивості.
5. Вкажіть особливості термічної обробки та можливі галузі застосування досліджуваних сплавів.

1.5 ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

У звіті необхідно:

1. Вказати порядковий номер і назву лабораторної роботи.
2. Висвітлити тему роботи.
3. Сформулювати основні поняття про будову та принцип класифікації сплавів алюмінію.
4. Подати схематичні рисунки мікроструктур зразків досліджуваних сплавів з позначеннями структурних та фазових складових.
5. Кожнен рисунок супроводжувати підписом та коментарем, у якому вказати хімічний склад, класифікувати сплав за структурою та призначенням, охарактеризувати особливості його будови та застосування.

1.6 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Охарактеризувати основні властивості алюмінію.
2. Як маркують алюмінієві сплави?
3. Охарактеризувати зв'язок властивостей алюмінієвих сплавів з діаграмою стану.
4. Які основні групи деформівних алюмінієвих сплавів ви знаєте?
5. Охарактеризувати принципи зміцнення алюмінієвих сплавів.
6. Як впливають постійні домішки на властивості технічного алюмінію?
7. Як класифікують алюмінієві сплави?
8. Які фази у складі можуть зменшувати пластичність алюмінію та окричувати його?

9. Які види термічної обробки застосовують для алюмінієвих сплавів?
10. Як впливає легування манганом та магнієм на властивості сплавів на основі алюмінію?
11. Які сплави називають дуралюмінами? Вкажіть особливості їх фазового складу, термічної обробки та застосування.
12. Склад, характер термічної обробки, властивості та застосування деформівних алюмінієвих сплавів, що зміцнюються термічною обробкою.
13. Склад, властивості та застосування ливарних алюмінієвих сплавів.
14. Способи підвищення механічних властивостей ливарних алюмінієвих сплавів.
15. Особливості будови порошкових алюмінієвих сплавів.
16. Спосіб одержання та властивості спечених алюмінієвих сплавів на основі системи Al-Al₂O₃ (САП).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНУ ТА СПЛАВІВ НА ЙОГО ОСНОВІ

Мета роботи: ознайомитись з властивостями, застосуванням, структурними методами підвищення питомої міцності, жароміцності та корозійної стійкості; самостійно провести дослідження мікроструктури окремих деформівних та ливарних титанових сплавів.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1 ТИТАН, ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

На сучасному етапі розвитку машинобудування все більше зростають вимоги до металевих матеріалів. Промисловості необхідні метали й сплави з підвищеною міцністю при різних температурах експлуатації, досить пластичні і в'язкі, стійкі проти дії агресивних середовищ, що мають ряд спеціальних властивостей.

Завдяки особливим фізико-механічним властивостям титан знаходиться у ряді нових конструкційних матеріалів, які значною мірою задовольняють ці вимоги.

Безупинне розширення виробництва і застосування титану в різних галузях техніки зумовлене насамперед його підвищеною питомою міцністю (відношення межі міцності до густини). Відмінна корозійна стійкість титану в атмосферних умовах, морській воді і ряді високоагресивних середовищ обумовлює ефективне його використання для виготовлення конструкцій, що працюють у найважчих умовах експлуатації.

Титан – один із найбільш розповсюджених елементів. За вмістом у земній корі він посідає четверте місце після алюмінію, заліза і магнію.

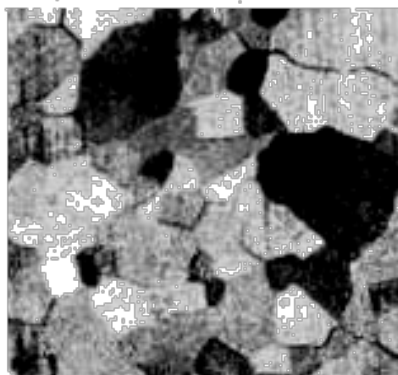
Зараз вітчизняна промисловість випускає широку номенклатуру напівфабрикатів з титану і сплавів на його основі. Це листи, плити, прутки, труби, дріт, профілі, панелі, штамповки. Збільшуються габарити напівфабрикатів, освоюються їхні нові види і форми, підвищується точність.

Створено і знаходять промислове застосування різні за призначенням титанові сплави: конструкційні, жароміцні, для роботи при низьких температурах, корозієстійкі тощо. Досить перспективними є високолеговані термічно зміцнювані титанові сплави, що дозволяють найбільш повно реалізувати всі переваги сплавів такого типу (Додаток Г).

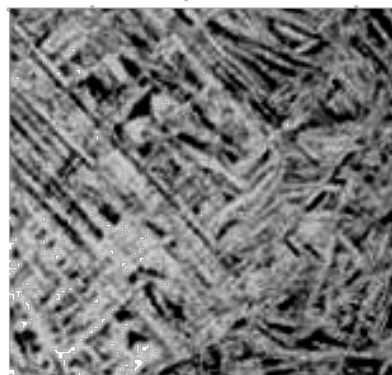
Обсяг промислового використання титанових сплавів багато в чому залежить від досконалості технологічних процесів виготовлення конструкцій і, в першу чергу, від зварювання.

Титан – поліморфний метал і може знаходитися у вигляді двох алотропічних модифікацій: низькотемпературної α , стійкої до $882,5^{\circ}\text{C}$, яка має гексагональну щільноупаковану решітку. Від $882,5^{\circ}\text{C}$ до точки плавлення ($T_{\text{пл}}=1668^{\circ}\text{C}$) стабільна високотемпературна β -модифікація титану з ОЦК решіткою. Поліморфне перетворення дає можливість зміцнювати сплави на основі титану термічною обробкою.

β -фазу титану при нормальній температурі не вдається зберегти навіть при швидкому охолодженні металу, нагрітого вище від температури $\beta \rightarrow \alpha$ -перетворення, наприклад гартуванням у воду. При охолодженні з будь-якою швидкістю наявне перетворення β -фази на α -фазу, що має бездифузійний, мартенситний характер. Однак, залежно від швидкості охолодження, виникають різні кінцеві мікроструктури чистого титану від звичайної поліедричної рівноважної структури α -фази, що характерна для чистих металів при формуванні структури в умовах повільного охолодження (рис. 2.1, а) до мартенситоподібної у вигляді зазубрених пластин при швидкому охолодженні. Така голчаста структура перетвореної β -фази зветься α -фазою (рис. 2.1, б).



а



б

Рисунок 2.1 Мікроструктура титану:

а – кований і відпалений титан з рівноважними зернами α -фази, $\times 250$;

б – технічно чистий титан, загартований з β -поля: голчаста структура перетвореної β -фази, $\times 250$

Чистий титан має підвищену пластичність. Це пояснюється тим, що на відміну від класичних гексагональних металів, наприклад магнію, які мають переважно одну площину ковзання, в α -титані ковзання відбувається переважно по 4 площинах (призматичних та пірамідальних), які лежать у площині базису.

Механічні властивості титану істотно залежать від чистоти металу, від домішок. Розрізняють домішки проникнення – *кисень, азот, вуглець, водень* і домішки заміщення, до яких відносять *залізо та кремній*. Хоча домішки підвищують міцність, але одночасно різко зменшують пластичність, причому найбільш негативну дію завдають домішки проникнення, особливо газу. При введенні всього лише 0,03% H, 0,2% N або 0,7% O титан повністю втрачає здатність до пластичного деформування та крихко руйнується.

На поверхні титану легко утворюється стійка плівка завтовшки 5-6 нм, тому титан має високу корозійну стійкість в атмосфері, прісній та морській воді і деяких кислотах, стійкі проти кавітаційної корозії та корозії під напруженням.

Недоліком титану є погана оброблюваність різанням.

2.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Оскільки технічний титан має порівняно низьку межу міцності (до 550 МПа), сфера застосування його як конструкційного матеріалу досить обмежена. Сплави на основі титану дозволяють забезпечити велику міцність при нормальних і високих температурах, достатню пластичність і в'язкість, зберігають стійкість проти дії агресивних середовищ, а також мають деякі спеціальні властивості, що у поєднанні з високою питомою міцністю у ряді випадків робить їх незамінним конструкційним матеріалом. Великий діапазон титанових сплавів з різноманітними структурами обумовлений поліморфізмом титану, гарною розчинністю багатьох елементів, принаймні, в одній з фаз, а також утворенням хімічних сполук із змінною розчинністю в титані.

Титанові сплави у порівнянні з алюмінієвими та магнієвими мають більшу питому міцність, жароміцність та корозійну стійкість. Працюють до температур 500°C.

Основними легуючими елементами титанових сплавів є *алюміній, молібден, ванадій, марганець, хром, олово, кремній, цирконій, ніобій, залізо*. За своїм впливом на температуру поліморфного перетворення (рис. 2.2) легуючі елементи поділяють на – стабілізатори (*алюміній, кисень, азот – розширюють α -область*), β -стабілізатори (*молібден, ванадій, марганець, хром, залізо – розширюють β -область*) та нейтральні (*олово, цирконій, гафній, торій* мало впливають на $\alpha \rightarrow \beta$ перетворення).

Практично всі титанові сплави в своєму складі містять алюміній Al, який зменшує густину сплаву, знижує здатність до водневої крихкості, підвищує окалинотійкість, модуль пружності та характеристики міцності (до 6...8%). Більшість β -стабілізаторів підвищують міцність, жароміцність, термічну стабільність, дещо зменшують пластичність.

Для досягнення вищих механічних властивостей сплави системи Ti-Al додатково легують Cr, Fe, Mn, Si. Висока жароміцність досягається легуванням

Мо та Zr, корозійна стійкість – Мо, Nb та Ta. Легування Sn забезпечує підвищення міцності Ti-Al сплавів без їх окрихчення.

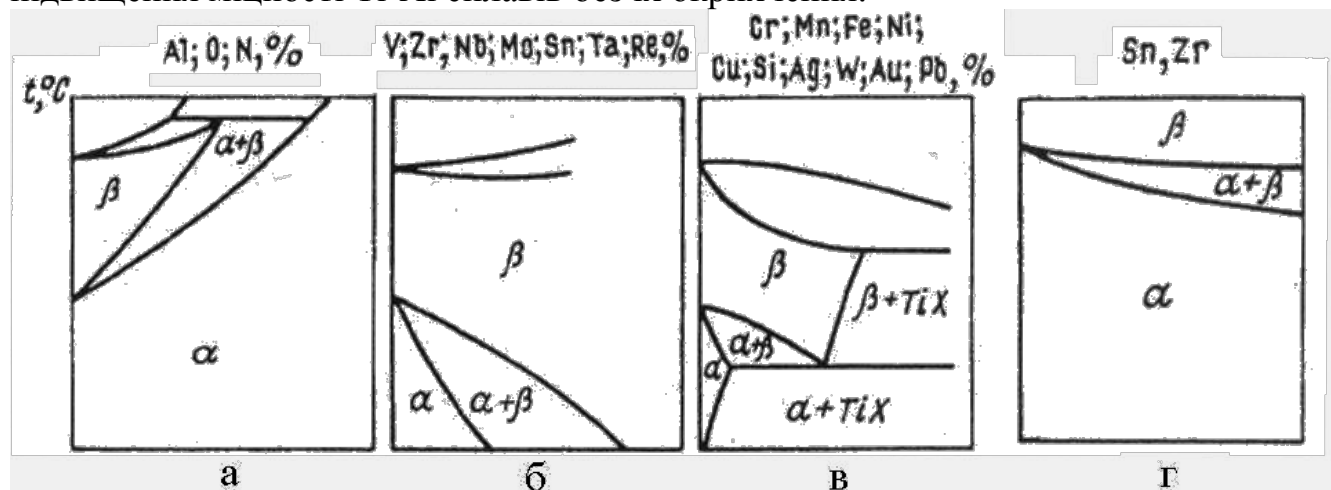


Рисунок 2.2 Діаграми стану систем титан – легуючий елемент (схеми):

а – Ti- α -стабілізатори; б – ізоморфні β -стабілізатори;
в – Ti-евтектоїдні β -стабілізатори; г – Ti-нейтральні елементи.

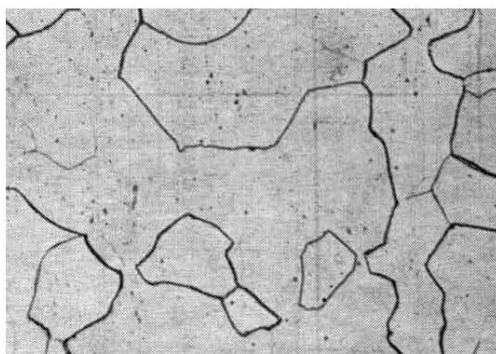
Легування змінює структуру титанових сплавів через вплив на температуру поліморфного перетворення та утворення хімічних сполук Ti з атомами легувальних елементів. Основними фазами сплавів в рівноважному стані є тверді розчини легувальних елементів в Ti_α та в Ti_β (α - та β -фази). Після гартування утворюється мартенситна структура.

Титанові сплави класифікують за різними ознаками:

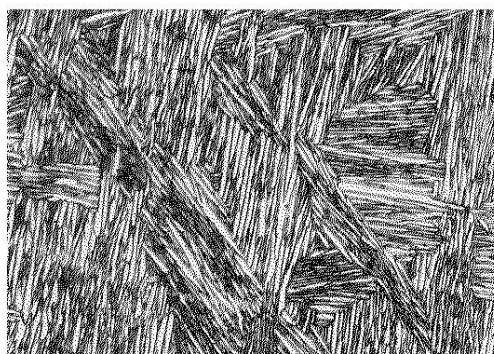
- за технологією виготовлення (деформівні, ливарні та порошкові);
- за здатністю зміцнюватися термічною обробкою (такі, що зміцнюються і що не зміцнюються);
- за механічними властивостями (сплави нормальної міцності, високоміцні, жароміцні, високопластичні);
- за структурою в рівноважному стані (після відпалу) або після гартування (Додаток Д, табл. Д.1).

Маркуються літерами ВТ, ОТ, АТ (наприклад, ВТ8, ОТ4-1, АТ3). У ливарних сплавах додається літера Л (ВТ5Л), цифра вказує на умовний номер.

У відпаленому стані сплави поділяються на однофазні (зі структурою α - або β -твердого розчину, рис. 2.3, б). Термічною обробкою зміцнюються двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави.



а



б

Рисунок 2.3 Мікроструктура сплавів титану у рівноважному стані:
а – однофазний, б – двофазний сплав; $\times 200$

За структурою у відпаленому стані конструкційні деформівні титанові сплави розрізняють на α , псевдо- α , $(\alpha+\beta)$ -, псевдо- β - та β -сплави (табл. 2.1).

Таблиця 2.1
Механічні властивості титанових сплавів (ДСТУ 19807-74)

Марка сплаву	Клас за структурою	σ_B , МПа	δ , %, не менше	KCU, Дж/см ² , не менше	Термо-оброблення	Область застосування
Технічний титан BT1-0	α -сплав	390-540	20	100	Відпал	Хімічна промисловість, кріогенні установки
BT5 BT5-1 OT4	α -сплав α -сплав Псевдо α -сплав	700-950 750-950 700-900	10 10 12	50 40 40	Те ж » »	Деталі для роботи при кріогенних і підвищених температурах до 450°C
BT6 BT14	$(\alpha+\beta)$ -сплав мартенситного класу Те ж	1100-1150 1150-1400	14 6	40 50	Відпал, гартування, старіння Те ж	Зварні конструкції для тривалої роботи при 400°C, короткочасно до 750°C
BT16	»	1150-1250	4	—	»	Деталі для тривалої роботи до 350°C
BT22	$(\alpha+\beta)$ -сплав	1100-1500	9	—	»	Деталі, що працюють при 500°C
BT15	Псевдо β -сплав	1300-1800	4	—	»	Деталі для тривалої роботи до 350°C, короткочасно до 750°C

До α -сплавів належать сплави титану з алюмінієм, а також сплави додатково леговані оловом чи цирконієм. Псевдо- α -сплави мають переважно α -структуру та велику кількість β -фази (до 8%) внаслідок додаткового легування β -стабілізаторами (*марганець, ванадій, ніобій, молібден та цирконій*). Двофазні ($\alpha+\beta$)-сплави, леговані алюмінієм та β -стабілізаторами, і в стабільному стані мають від 3 до 10% β -фази. У відпаленому стані мають гарне співвідношення міцності і пластичності, їх можна зміцнювати термічною обробкою. Однофазні β -сплави не мають промислового використання оскільки вони дорого коштують і для них характерна знижена питома міцність, до їх складу входять *ванадій, молібден та титан* в значній кількості (до 33%).

Псевдо- β -сплави мають β -структуру з невеликою кількістю α -фази. Для легування використовують молібден, ванадій, хром, цирконій (сумарна кількість легуючих елементів складає приблизно 20%). Міцність таких сплавів досягає 1000 МПа. У таблиці Д.1 (додаток Д) наведено склад і властивості найбільш розповсюджених титанових сплавів.

2.3 ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФОРМІВНИХ І ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

Найбільшого поширення набули α -сплави титану, оскільки вони технологічні і мають задовільну пластичність при обробці тиском. З цих сплавів виготовляють листи, смуги, плити, поковки, штамповані і заготовки, пресовані профілі, труби, дріт. Вони добре зварюються, мають високу корозійну стійкість в атмосферних умовах і у багатьох агресивних середовищах. Найменшу міцність має нелегований технічний (BT1-00, BT1-0) титан. Однак він має найвищі пластичність і корозійну стійкість. Технічний титан застосовується у конструкціях, що працюють довгостроково при температурах до 200...250°C.

Типові однофазні сплави зі структурою α -фази (BT5 і BT5-1) мають невисоку технологічну пластичність, але відзначаються гарною жароміцністю і використовуються в конструкціях, що працюють довгостроково при 400°C.

Псевдо- α -сплави, що містять, як вказувалося, крім α -стабілізаторів невелику кількість β -стабілізуючих елементів, добре штампуються, гнуться, обробляються різанням, задовільно зварюються. З цієї групи сплавів у промисловості широко використовуються сплави загального призначення марок OT4-0, OT4-1, OT4. Вміст мангану в них приблизно однаковий, проте алюмінію – різний, завдяки чому рівень міцності змінюється в широких межах і значно зростає жароміцність. Ці сплави призначаються для виробів, що працюють довгостроково при температурах 350...500°C та короткочасно – при 700...800°C. Слід зазначити, що найбільш міцний і жароміцний сплав OT4-2 є найменш пластичним. Аналогічний вплив алюмінію на міцність і жароміцність спостерігається у сплавах марок AT3, AT4 і AT6. Підвищують жароміцність титанових сплавів введенням, поряд із алюмінієм, нейтральних зміцнювачів – олова і цирконію (сплави BT20, TC5 і BT5-1). Псевдо- α -сплави відносять до сплавів середньої міцності. Вони термічно стабільні і малочутливі до

зміцнювальної термічної обробки. На цю групу сплавів припадає максимальний обсяг виробництва напівфабрикатів, що застосовуються у машинобудуванні.

Двофазні ($\alpha+\beta$) – сплави марок ВТЗ-1, ВТ14, ВТ16, ВТ22 і ВТ23 після відпалу (рис. 2.4) мають задовільні технологічні властивості. Тому у відпаленому стані з них, як правило, виготовляють конструкції, що потім можна піддавати зміцнювальній термічній обробці – гартуванню і старінню. Як видно з табл. Д.1 (додаток Д), границя міцності двофазних сплавів після такої термічної обробки може досягати 1400 МПа і більше. Двофазні термічно зміцнювані сплави застосовують для виготовлення навантажених конструкцій, що працюють при температурах до 400°C. Сплави ВТ15 і ТС6 є ще більш легованими і у рівноважному стані належать до псевдо- β -сплавів. Після гартування з β -області вони майже цілком зберігають β -структуру і мають чудову пластичність. Однак переваги цих сплавів, як конструкційного матеріалу, виявляються після гартування і старіння.

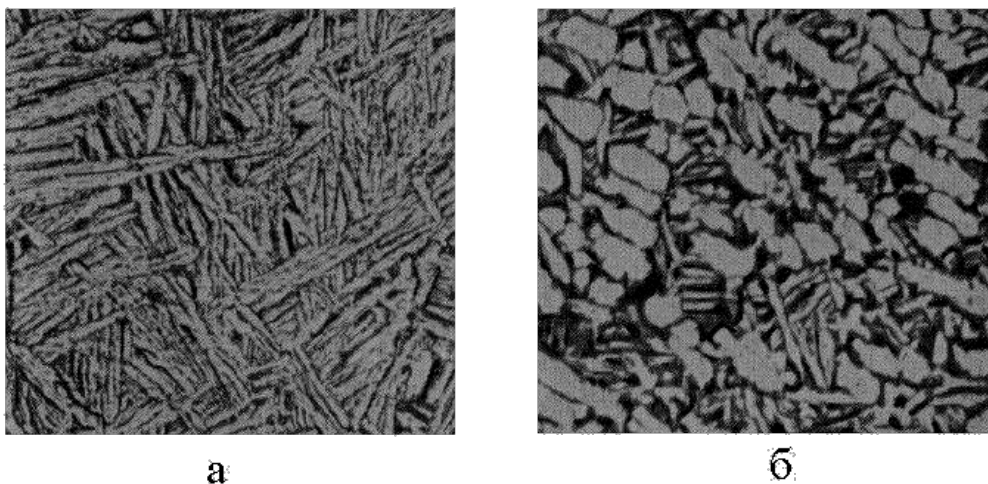


Рисунок 2.4 Мікроструктури сплаву ВТЗ після деформації та ізотермічного відпалу:
а – в $(\alpha+\beta)$ -області, x250; б – в α -області, x250

Широкому застосуванню високоміцних $(\alpha+\beta)$ - і псевдо- β -сплавів у зварних конструкціях перешкоджає недостатня пластичність зварних з'єднань у термічно зміцненому стані.

Крім розглянутих вище, значний інтерес становлять титанові сплави зі спеціальними властивостями: для роботи при криогенних температурах, в особливо агресивних середовищах тощо. У наш час для виготовлення деталей і конструкцій, що працюють при криогенних температурах, рекомендуються титанові сплави марок ВТ1-0, АТ2, ОТ4, ВТ5-1, ВТ6С і ВТ14. Перші чотири марки можна використовувати при температурах до мінус 253°С, а дві останні – при температурах не нижче за мінус 193°С.

Слід зазначити, що висока пластичність і надійність роботи титанових сплавів при низьких температурах можуть бути гарантовані тільки за умови вмісту домішок, що не перевищують, %: 0,1 O₂; 0,3 N₃; 0,04 C і 0,008 H₂.

Хоча титан є корозійно стійким металом, однак у деяких середовищах, наприклад, у безкисневих кислотах, його стійкість недостатня. Її можна підвищити шляхом легування великою кількістю молібдену (близько 30%), а також невеликими домішками паладію або платини. Такі сплави починають

застосовувати в спеціальних галузях хімічної промисловості.

Сплав 4201 має стабільну β -структуру; його рекомендують для апаратури, що зазнає при підвищених температурах впливу агресивних середовищ, які містять сірчану, соляну, мурашину кислоти.

Сплав 4201 має гарну технологічну пластичність і зварюється усіма видами зварювання.

Ливарні титанові сплави почали застосовувати для виробництва фасонних виливків значно пізніше, ніж для виробництва деформівних напівфабрикатів. Обумовлено це було необхідністю використовувати спеціалізоване ливарне устаткування, що дозволяє заливати форми у вакуумі. Крім того, хімічна активність розплавленого титану і висока температура лиття зумовили певні високі вимоги до матеріалу ливарних форм. Найкращою вогнетривкою основою формувальних сумішей для титанового лиття виявився графіт.

Для фасонного лиття використовують титанові сплави тих самих сполук, що і для виробництва деформівних напівфабрикатів. В кінці марки ливарного сплаву додають літеру Л (наприклад, ВТ5Л, ВТ20Л). Відмінність ливарного сплаву від деформівного полягає у тому, що у першому допускають більший вміст домішок.

Промислові титанові сплави не містять евтектик. Разом із тим, їхній інтервал кристалізації не перевищує 50...70°C, що зумовлює цілком задовільні ливарні властивості.

Міцність фасонних виливків знаходиться практично на тому ж рівні, що і zdeформованих напівфабрикатів, а показники пластичності, ударна в'язкість і утомні характеристики – істотно нижчі. Наприклад, у прутків зі сплавів ВТ5 $\delta \geq 10\%$ і $KCU \geq 50$ Дж/см², а виливок зі сплаву ВТ5Л $\delta \geq 6\%$ і $KCU \geq 30$ Дж/см². Це зумовлено тим, що при литті формується структура із великим β -зерном і пластинчастою α -фазою, яку термічна обробка не виправляє. Технічно чистий титан ВТ1Л і сплав ВТ5Л, що мають добрі корозійну стійкість і зварюваність, широко використовують для виливків деталей хімічного машинобудування, зокрема корпусів і робочих коліс насосів для перекачування агресивних рідин, патрубків, арматури тощо. Виливки з титанових сплавів дуже щільні і при гідравлічних випробуваннях брак практично відсутній.

Структура сплаву ВТ5Л представлена в основному пластинчастою α -фазою всередині вихідного β -зерна. Сплав не схильний до утворення гарячих тріщин, добре зварюється.

Сплави ВТ20Л, ВТ6Л і ВТ9Л використовують в авіаційній промисловості, зокрема, замість штамповок. Сплави ВТ20Л і ВТ9Л застосовують як жароміцні для роботи при температурах до 500°C. Ресурс роботи навантажених литих деталей з титанових сплавів підвищують за допомогою високотемпературної газостатичної обробки.

2.4 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Титанові сплави піддають таким видам термічної обробки:

- відпалу для зняття залишкових напружень та наклепу (рекристалізаційний відпал);
- відпалу з фазовою перекристалізацією;
- гартуванню з наступним старінням;
- азотуванню.

Відпал для зменшення залишкових напружень від попередньої обробки (різання, зварювання тощо) виконують, залежно від хімічного складу сплавів, в інтервалі температур 500-650°C з видержкою 1-15 год.

Рекристалізаційний відпал застосовують для усунення наклепу після холодної обробки сплавів тиском. Температура відпалу має бути вищою за температурний поріг рекристалізації, але для уникнення зміни фазового складу не повинна перевищувати температури переходу в β -стан. Відпал здійснюється переважно при 700-800°C у вакуумі чи нейтральній атмосфері для захисту від насичення газами та окрихчування.

Відпал з фазовою перекристалізацією використовують для подрібнення зерна. Для цього застосовують комбіновану обробку: відпал з неповною фазовою перекристалізацією з $(\alpha+\beta)$ -стану (нагрів дещо нижче $T_{пл}$) та наступний рекристалізаційний відпал.

Гартування для більшості титанових сплавів виконують з інтервалу температур 850-950°C найчастіше у воді. Глибина прогартуваності титанових сплавів відносно мала і для більшості сплавів не перевищує 25 мм.

В результаті гартування утворюється *мартенсит* – пересичений твердий розчин легувальних елементів у T_α (рис. 2.5). Оскільки основні легувальні елементи титанових сплавів є елементами заміщення, то вони незначно зміцнюють сплав. Для отримання необхідних властивостей після гартування проводять *старіння*.

Старіння забезпечує зміцнення за рахунок виділення дисперсних фаз. Режим старіння залежить від багатьох чинників. Старіння проводять переважно в інтервалі 450-600°C протягом 1-16 год.



Рисунок 2.5 Мартенситна структура загартованого сплаву VT3-1, x300

Азотування застосовують для підвищення зносостійкості титанових сплавів. Азотують вироби при температурі 850-950°C протягом 10-50 год в атмосфері сухого азоту. Внаслідок азотування на поверхні утворюється нітридний шар завтовшки до 0,2 мм з твердістю 1000-1200 HV.

2.5 ЗАСТОСУВАННЯ ТИТАНУ І ЙОГО СПЛАВІВ У ХІМІЧНОМУ ТА ХАРЧОВОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

Переважну більшість промислових титанових сплавів становлять α -, ($\alpha+\beta$)-, β -тверді розчини, або тверді розчини з досить невеликою кількістю хімічних сполук. Ведуться роботи зі створення титанових сплавів на основі хімічних сполук, головним чином алюмінідів і нікелідів титану.

Конструкційні та високоміцні титанові сплави становлять α -, ($\alpha+\beta$)-, β -тверді розчини, що дозволяє забезпечувати оптимальне співвідношення характеристик міцності і пластичності.

Жароміцні титанові сплави становлять α -, ($\alpha+\beta$)- тверді розчини з більшою або меншою кількістю хімічної сполуки, що забезпечує їм підвищену жароміцність при мінімальному зниженні пластичності.

Наведені в табл. 2.2 основні групи промислових титанових сплавів мають свої технологічні особливості та області застосування в хімічному машинобудуванні.

Таблиця 2.2

Класифікація титанових сплавів (ДСТУ 19807-74)

Група сплавів	Марка сплаву	Середній хімічний склад, % (мас.)
α -сплави	BT1-00	Нелегований титан
	BT1-0	Те ж
	BT5	Ti – 5Al – 2,5Sn
	BT5-1	Ti – 5Al – 2,5Sn
псевдо α -сплави	OT4-0	Ti – 0,8Al – 0,8Mn
	OT4-1	Ti – 1,5Al – 1,0Mn
	OT4	Ti – 3,5Al – 1,5Mn
	BT20	Ti – 6,0Al – 1,0Mo – 1V – 2Zr
$(\alpha+\beta)$ -сплави мартенситного класу	BT6C	Ti – 5Al – 4,0V
	BT6	Ti – 6Al – 4,5V
	BT14	Ti – 4,5Al – 3Mo – 1V
	BT16	Ti – 2,5Al – 5Mo – 5V
	BT23	Ti – 5,5Al – 2Mo – 4,5V – 1Cr – 0,7Fe
$(\alpha+\beta)$ -сплави перехідного класу	BT22	Ti – 5Al – 5Mo – 5V – 1Fe – 1Cr
	BT22И	Ti – 2,5Al – 5Mo – 5V – 1,0Fe – 1,0Cr
	BT30	Ti – 11Mo – 6Sn – 4Zr
псевдо β -сплави	BT35	Ti – 3Al – 1,5Mo – 15V – 3Sn – 3Cr
	BT32	Ti – 2,5Al – 8,5Mo – 8,5V – 1,2Fe – 1,2Cr
	BT15	Ti – 3Al – 7Mo – 11Cr
β -сплави	4201	Ti – 33Mo

Стійкість титану до хлормістких оксидних середовищ обумовила його широке використання в хімічній промисловості для виробництва хрому, хлоратів, діоксиду хлору, лимонної кислоти, для виготовлення устаткування для целюлоз-паперової промисловості. При цьому устаткування з титанових сплавів характеризується високою довговічністю і низькими витратами на поточний ремонт. Завдяки високій стійкості до хлоридної дії титанові контейнери доцільно використати для поховання радіоактивних відходів у спеціальних підземних шахтах і галереях.

У вітчизняній промисловості титанові сплави застосовуються, головним чином, у хімічному, важкому, енергетичному і транспортному машинобудуванні, машинобудуванні для легкої, харчової промисловості та у побутових приладах.

Стандартне устаткування, в основному, виготовляється заводами хімічного машинобудування. Номенклатура цих заводів досить широка і включає в себе запірну (вентилі, кульові та зворотні крани), помпувальну (насоси), ємнісну та спеціальну апаратури.

Висока корозійна стійкість у різних середовищах робить сплави титану перспективними для застосування в харчовій промисловості. Деякі харчові продукти можуть псуватися від контакту зі сталлю, тоді як титан не надає їм стороннього запаху, кольору або смаку. Завдяки пластичності та в'язкості при низьких температурах, титанові сплави застосовуються в холодильній і кріогенній техніці.

Усе більше розширюється застосування титану в спортивному інвентарі (спортивні велосипеди, альпіністське спорядження).

Титан використовується в медицині завдяки повній біологічній сумісності з тканинами людського організму. Титан не відторгається кістковою і м'язовою тканинами та легко обростає ними. За своєю біологічною інертністю він перевершує всі відомі корозійностійкі сталі і сплави. Титан і його сплави (наприклад, ВТ6 і ВТ14) є ідеальним матеріалом для протезування. Поєднання високої питомої міцності та практично ідеальної сумісності титану і його сплавів з тканинами людського організму робить їх найбільш перспективним матеріалом для виготовлення протезів (заміна кісток), імплантантів, зубних металокерамічних коронок і каркасів мостоподібних протезів, базисів знімних зубних протезів. В ортопедичній хірургії титанові сплави використовують як протези плечових, стегнових, колінних суглобів, а також для з'єднання і зрощування переламів. Їх застосовують для виготовлення серцево-судинних клапанів і електронних стимуляторів.

В Японії широко використовують листовий титан для зовнішнього обшивання дахів, внутрішнього інтер'єра.

На титанових виробках методом анодного окислювання можна утворювати шари оксидів різної товщини, що змінюють колір поверхні. Регулюючи рівень напруг і час оброблення, можна одержати темно-синій, ясно-синій, жовтий, рожевий, бірюзовий, зелений кольори. Відпалювання титанових виробів в атмосфері азоту або іонноплазмове оброблення дозволяють формувати на поверхні стійкі нітриди титану золотих відтінків. Цю технологію використана для реставрації пам'ятників і виготовлення хрестів і дахів на відновлюваних і заново побудованих церковних спорудах.

Широке впровадження титанових сплавів поки стримується їх порівняно високою вартістю. Пояснюється це високою спорідненістю титану до багатьох елементів і міцністю хімічних зв'язків у його природних сполуках. Удосконалення технологічних процесів виробництва і широкі перспективи застосування титанових сплавів у різних галузях дозволяють упевнено стверджувати, що вони стануть найважливішими конструкційними матеріалами найближчого майбутнього.

2.6 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

Мікроскопи металографічні МИМ-7, мікрошліфи деформівного та відпаленого технічного титану ВТ1-0, загартованого з β -поля титана ВТ1-0 і сплавів ВТ5, ОТ4, ВТ3, ВТ6, ВТ5Л у різному структурному стані, атлас мікроструктур.

2.7 ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Отримайте протравлені мікрошліфи титанових сплавів відомого хімічного складу: ВТ1-0, ОТ4, ВТ3, ВТ5, ВТ6, ВТ5Л у деформівному стані та після рекристалізаційного відпалу.
2. Розгляньте мікроструктури зразків за збільшень у 100...1000 разів та схематично їх замалюйте.
3. За атласом охарактеризуйте мікроструктури кожного сплаву.
4. За маркою сплаву розшифруйте його хімічний склад, класифікуйте за структурою та призначенням, охарактеризуйте властивості.
5. Вкажіть можливі галузі застосування досліджуваних сплавів.

2.8 ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

У звіті необхідно:

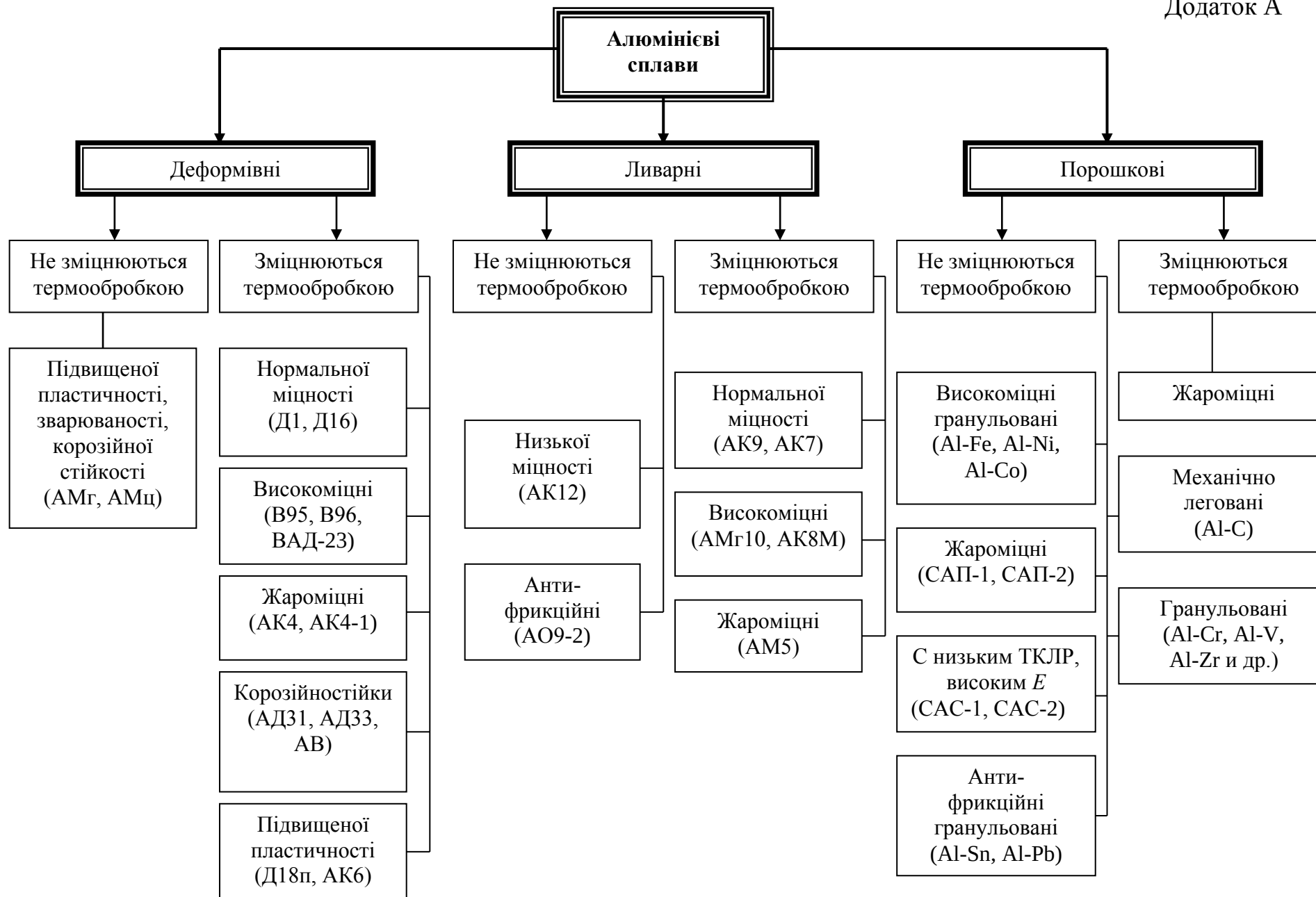
1. Вказати порядковий номер і назву лабораторної роботи.
2. Висвітлити мету роботи.
3. Сформулювати основні поняття про структуру титанових сплавів.
4. Подати схематичні рисунки мікроструктур зразків досліджуваних сплавів з характеристикою особливостей їх будови.
5. Кожен рисунок супроводжувати підписом та коментарем, у якому за літературними даними охарактеризувати особливості структури та застосування титанових сплавів.

2.9 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Титан, його властивості. Порівняйте властивості Al і Ti. В чому переваги титану?
2. Вплив водню на структуру і властивості титану.
3. За якими ознаками класифікують титанові сплави?
4. Вплив α -стабілізаторів на структуру і властивості титану.
5. Вплив β -стабілізаторів на структуру і властивості титану.
6. Вплив нейтрально зміцнювальних елементів на структуру і властивості титану.
7. Склад, структура та властивості однофазних α -титанових сплавів.
8. Склад, структура та властивості однофазних β -титанових сплавів.
9. Склад, структура та властивості двофазних ($\alpha+\beta$) – титанових сплавів.
10. Термічна обробка титанових сплавів.
11. В яких галузях промисловості використовують титанові сплави? Поясніть, чому?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович В., Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство [Текст]: Практикум. Навч. посібник / В.Попович, А.Кондин, Е.Плешаков та ін.- Львів: Вид-во «Папуга», 2004.– 442 с.
2. Колачев Б.А., Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [Текст]: учебн. Пособие для вузов/ Б.А.Калачев, В.А.Ливанов, В.И.Елагин.– Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Металлургия, 1981, 416 с.
3. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов.[Текст] / М.В.Мальцев. – М.: Металлургия, 1970.-308 с.
4. Бялік О.М. Металознавство [Текст]: Підручник / О.М.Бялік, В.С.Черненко, В.М.Писаренко, Ю.Н. Москаленко. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2008 – 384 с.
5. Солнцев Ю.П. Спеціальні конструкційні матеріали [Текст]: Підручник / Ю.П. Солнцев, С.Б. Беліков, І.П. Волчок, С.П. Шейко. – Запоріжжя: «ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ», 2010.– 536 с.
6. Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы [Текст]: Справочное руководство. – М.: Металлургия, 1972.–552 с.
7. ГОСТ 4784-74 (СТ СЭВ 730-77, СТ СЭВ 966-78). Алюминий и сплавы алюминиевые. Марки. [Текст]: М.: Изд-во стандартов, 1983.-9 с.
8. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. [Текст]: - К.: Держстандарт України, 1995.– 49 с.
9. Горынин И.В. Титан в машиностроении. [Текст]: монография / И.В.Горынин, Б.Б.Чечулин – М.: Машиностроение, 1990.– 400 с.
10. Борисова Е.А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов [Текст]: монография / Е.А.Борисова, Г.А. Бочвар, М.Я. Брун [и др.] – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
11. Чечулин Б.Б. Титановые сплавы в машиностроении [Текст]: монография / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушаков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.



Спечені алюмінієві сплави:
(спечені алюмінієві порошки – САП і сплави – САС)

Матеріали на основі алюмінію, одержані методами порошкової металургії застосовують у тих випадках, коли вироби не можуть бути виготовлені методами *лиття* або *обробки тиском*. Порошкові алюмінієві сплави у порівнянні з ливарними характеризуються підвищеною міцністю, стабільними властивостями при підвищених температурах і корозійною стійкістю.

Структура спеціальних матеріалів, одержуваних методами порошкової або гранульної металургії, складається з чистого алюмінію або твердого розчину легувальних елементів на його основі з рівномірно розподіленими дисперсними часточками Al_2O_3 , або інтерметалідами хрому, цирконію, заліза та інших елементів з Алюмінієм – Al_7Cr , Al_3Zr , Al_3Fe тощо.

Механізми зміцнення сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, та спеціальних алюмінієвих сплавів істотно відрізняються за природою зміцнення матричної фази дисперсними частинками. Зміцнення сплавів типу дуралюмінів відбувається за рахунок виділення дисперсних інтерметалевих часточок під час розпаду пересиченого твердого розчину, тому за підвищених температур сплави поступово втрачають міцність внаслідок укрупнення та розчинення зміцнювальної фази. У ливарних та деформівних сплавах оксиди та інтерметаліди, які нерозчинні у матриці, мають досить великі розміри. Розташовуючись на межах зерен, вони негативно впливають на механічні властивості матеріалу. В алюмінієвих сплавах, одержуваних методами порошкової та гранульної металургії, дуже дисперсні часточки зміцнювальної фази рівномірно розподілені у матриці і практично нерозчинні у ній.

Алюмінієві сплави такого типу поділяють на дві групи.

Сплави першої групи називають **спеченим алюмінієвим порошком** (пудрою) (САП). Їх одержують пресуванням та спіканням окисленої алюмінієвої пудри, часточки якої мають форму лусочок завтовшки менше, ніж 1 мкм, і які покриті дуже тонкою плівкою Al_2O_3 . Під час пресування напівфабрикатів, що містять 6,0...17,0% Al_2O_3 , оксидна плівка розтріскується і рівномірно розподіляється в алюмінієвій матриці у вигляді дрібнодисперсних часточок діаметром 0,1...0,01 мкм, які не розчиняються в алюмінії і не схильні до коагуляції за тривалого нагрівання до 500°C. Чим менша відстань між часточками оксиду, тим вища міцність САП внаслідок зростання опору рухові дислокацій.

САП за механічними властивостями поступаються багатьом деформівним сплавам (за кімнатної температури σ_B до 500 МПа, $\sigma_{0,2}$ до 300 МПа, δ до 8%). Проте за жароміцністю САП переважають їх; вони здатні зберігати стабільну структуру та високу міцність навіть близько 350°C. Фізичні властивості САП близькі до властивостей алюмінієвих сплавів. Технологічна пластичність САП гірша, ніж у деформівних сплавів алюмінію, тому обробку тиском САП проводять за 420...470°C. Вони легко обробляються різанням, задовільно зварюються контактним і аргонодуговим способом. Корозійна стійкість САП є

такою самою, як і технічного алюмінію. Ці сплави не схильні до корозії під напруженням.

Стан і властивості деяких типових спечених алюмінієвих порошків наведено в таблиці В.1.

Таблиця В.1

Властивості і склад типових матеріалів із САП (при 20°C)

Марка матеріалу	Вміст Al_2O_3 , %	Показники властивостей		
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
САП-1	6...9	290	220	7
САП-2	9,1...13	350	280	4
САП-3	13,1...17	410	320	3
САП-4	18...22	450	370	1,5

Другу групу спеціальних сплавів становлять *гранульовані* алюмінієві сплави з мінімальною кількістю оксиду алюмінію (до 0,5%), леговані перехідними хімічними елементами (залізом, кобальтом, нікелем, хромом, цирконієм тощо).

Гранули одержують охолодженням крапель значно перегрітого розплаву з високою швидкістю (до 10^6 °C/с). За таких умов утворюється аномально пересичений твердий розчин перехідних металів в алюмінії, завдяки якому сплав зміцнюється. Зі збільшенням швидкості охолодження змінюються умови процесу кристалізації – часточки інтерметалевих фаз стають дрібнішими і рівномірніше розподіляються у сплаві, що підвищує його міцність. Таким чином, гранульовані сплави мають структуру твердого розчину хімічних елементів в алюмінії з дисперсними включеннями Al_2O_3 та нерозчинних або погано розчинних у твердому стані часточок інтерметалевих сполук. Середні розміри зміцнювальних інтерметалевих фаз та відстань між ними не перевищують 0,5...1,0 мкм. Середні розміри оксиду алюмінію такі самі як і в САП.

Додаткового зміцнення сплавів досягають у процесі одержання гранул у виробництві напівфабрикатів. Гранули зміцнюються під час гартування завдяки швидкому охолодженню розплаву, а процес старіння сплаву відбувається під час пресування брикетів з нагріванням близько 400...450°C. Унаслідок розпаду аномально пересичених твердих розчинів і виділення дисперсних часточок вторинних інтерметалідів отримують високу міцність сплавів (σ_B до 800 МПа).

Сплави алюмінію, леговані магнієм, манганом, міддю, хромом, титаном, залізом, цирконієм мають структуру твердого розчину з не схильними до коагуляції дисперсними часточками зміцнювальних фаз.

З гранул різноманітних сплавів алюмінію виробляють пресовані напівфабрикати (листи, профілі, труби тощо), які за своїми властивостями не поступаються одержаним обробкою тиском зі зливка. Спеціальні сплави алюмінію на відміну від литих мають дрібніші зерна, а також вищу міцність. Окрім дрібнозернистої структури, перевагою спечених алюмінієвих сплавів порівняно з ливарними подібного складу є відсутність ливарних дефектів

(ліквациї, шлакових включень, пористості) і довготриваліша міцність за 250..350°C.

Висока жароміцність дає змогу використовувати спеціальні алюмінієві сплави для виготовлення відповідальних деталей літаків, авіаційних та автомобільних двигунів, які працюють за температур 300...500°C. Висока корозійна стійкість обумовлює їх застосування в хімічній, нафтопереробній та суднобудівній галузях промисловості.

Серед найбільш перспективних гранульованих сплавів є сплави алюмінію, леговані Mn, Cr, Ti, які відрізняються підвищеною до 300°C жароміцністю. При легуванні нерозчинними в алюмінії Ni, Fe, Co досягається підвищення міцності, а при легуванні легкоплавкими Pb і Sn утворюються ефективні антифрикційні сплави.

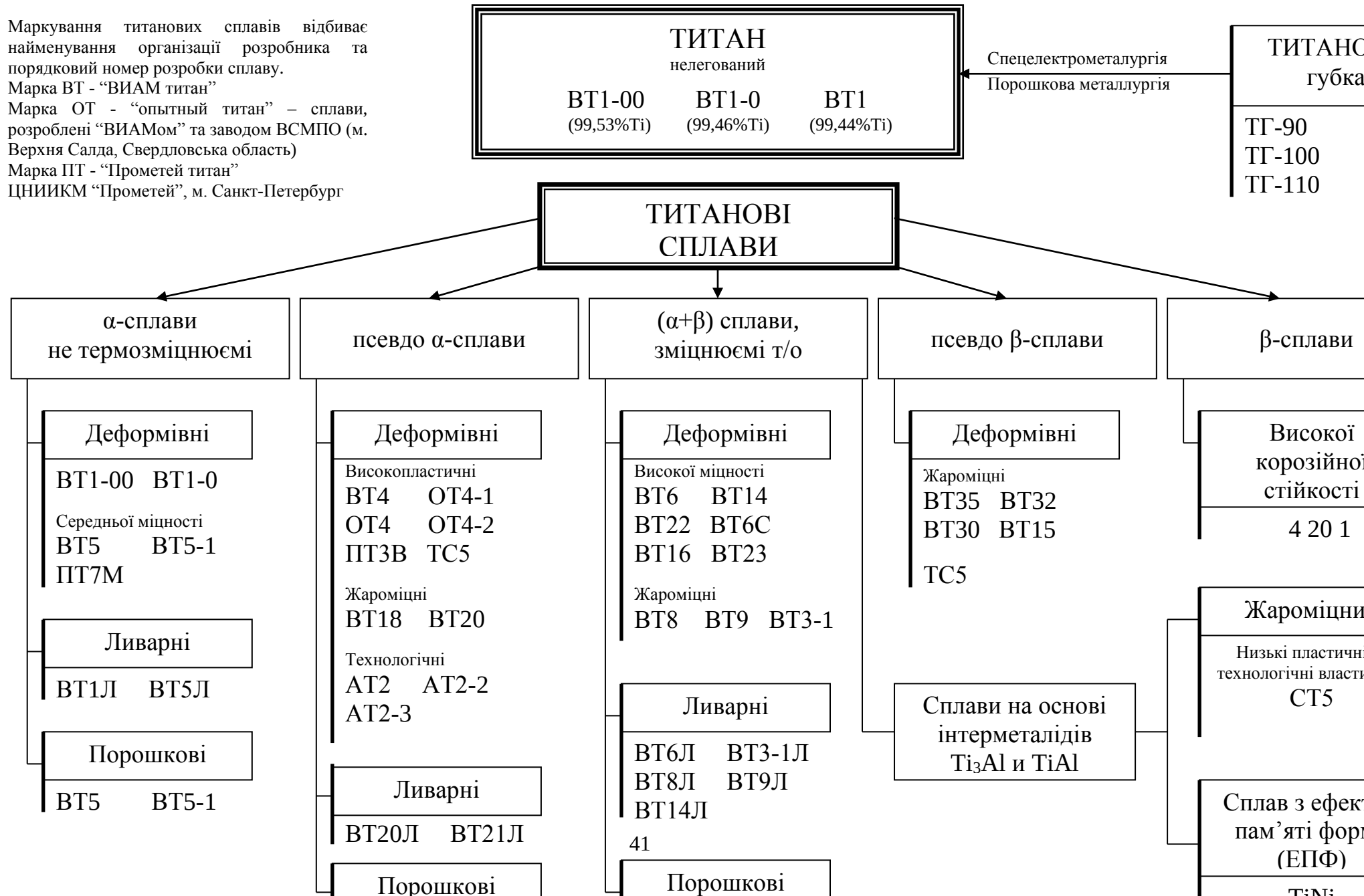
Таблиця В.1

Характеристики типових алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, середній вміст компонентів, %						Механічні властивості		Галузь використання
	Cu	Mg	Zn	Mn	Si	інші	σв, МПа	δ, %	
Сплави, що не зміцнюються термічною обробкою									
АМц	–	–	–	1,4		0,06Ti	130	23	Цистерни, баки, корпуси човнів, посуд
АМг3	–	3,5	–	0,5	0,065		190	15	
АМг5	–	5	–	0,6			270	18	
Сплави, що зміцнюються термічною обробкою									
Д1	4,3	0,6	–	0,6	0,8		410	15	Деталі літаків
Д16	4,3	1,6	–	0,6	0,5		520	11	
Високоміцні деформівні сплави									
В95	1,7	2,4	6,0	0,4	0,5	–	580	8	Деталі літаків, ракет
В96	2,5	2,8	8,0	0,4	–	0,22Cr	670	7	
Жароміцні сплави									
АК4-1	0,2	0,6		1,2	0,35	1Fe, 1Ni, 0,1Ti	430	12	Деталі літаків, ракет
Ливарні сплави									
АК12					11		180	5	Корпуси електродвигунів, поршні д.в.з.
АЛ4		0,2		0,4	9,5		180	5	
АЛ8		0					350	10	
АЛ9		0,3			7		180	2	
Високоміцні ливарні сплави									
АМ4,5Кд	0,5	–	–	0,6	–	0,2Ti, 0,1Cd	490	6	Деталі літаків, ракет
ВАЛ12	1	3	6	0,5		0,15Ti, 0,15Zr	560	6	
Жароміцні ливарні сплави									
АЛ1	0,2	0,5				2Ni	260	0,6	Поршні дизелів, деталі д.в.з.
АЛ20		0,9		0,22	1,7	0,2Cr, 1,4Fe, 0,1Ti	300	0,8	
САП						Al + 20% Al ₂ O ₃	450	1,7	Лопатки турбін, компресорні диски

Додаток Г

Маркування титанових сплавів відбиває найменування організації розробника та порядковий номер розробки сплаву.
 Марка ВТ - "ВИАМ титан"
 Марка ОТ - "опытный титан" – сплави, розроблені "ВИАМом" та заводом ВСМПО (м. Верхня Салда, Свердловська область)
 Марка ПТ - "Прометей титан"
 ЦНИИКМ "Прометей", м. Санкт-Петербург



Таблиця Д.1

Хімічний склад і механічні властивості
вітчизняних промислових титанових сплавів

Тип сплаву	Марка сплаву	Вміст легуючих елементів, %	σ_B , МПа	δ , %	
α -сплави	BT1-00	—	300...450	30	
	BT1-0	—	400...450	30	
	ПТ-7М	2,25 Al; 2,5 Zn	700	18	
	BT5	5 Al	750...900	10	
	BT5-1	5 Al; 2,5 Sn	750...900	12	
	4200	0,2 Pd	400...450	35	
Псевдо α -сплави	OT4-0	0,8 Al; 0,8 Mn	500...650	20	
	OT4-1	1,5 Al; 1 Mn	600...750	15	
	OT4	3,5 Al; 1,5 Mn	700...900	11	
	OT4-2	6 Al; 1,5 Mn	700...1050	8	
	BT4	5 Al; 1,5 Mn	1000...1200	10	
	ПТ3В	4 Al; 2 V	630...880	10	
	AT2	2 Zr; 1 Mo	850...1000	12	
	AT3	3 Al; 1,5 (Fe, Cr, Si)	600...750	20	
	AT4	4 Al; 1,5 (Fe, Cr, Si, B)	750...900	12	
	AT6	6 Al; 1,5 (Fe, Cr, Si)	850...1050	10	
	TC5	5 Al; 2 Zr; 3 Sn; 2 V	950...1100	8	
	BT20	6 Al; 2; 1 V	950...1150	8	
	$(\alpha+\beta)$ -сплави	TB3-1	6 Al; 2,5 Mo; 2 Cr; 0,3 Si; 0,5 Fe	≥ 1200	6
		BT6C	5 Al; 4 V	850...1000	12
		BT6	6 Al; 4,5 V	≥ 1100	7
BT8		6,5 Al; 3,3 Mo; 0,35 Si	1050...12050	11	
BT9		6,5 Al; 1 Zr; 3,3 Mo; 0,3 Si	1050...1250	11	
BT14		4,5 Al; 3 Mo; 1 V	≥ 1200	6	
BT16		2,5 Al; 5 Mo; 5 V	1100...1250	12	
BT18		6 Al; 1 Mo; 11 Zr; 1 Nb	1100...1250	9	
BT22		5 Al; 5 Mo; 5 V; 1 Fe; 1 Cr	1400...1550	5	
BT23		11 Mo; 6 Sn; 4 Zr	≥ 1400	5	
Псевдо β -сплави		BT30	3 Al; 7 Mo; 11 Cr	1200	5
		BT15	2,5 Al; 8,5 Mo; 8,5 V	1350...1500	4
	BT32	1,1 Cr; 1,2 Fe	1200	6	
	TC6	3 Al; 5 Mo; 6 V; 11 Cr	1450...1500	4	
β -сплави	4201	33 Mo	800...850	10	