

**Міністерство освіти і науки України
Дніпропетровський національний університет
ім. Олеся Гончара**

Н.Є. Калініна, О.В. Бондаренко

**ВИКОРИСТАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ
В АВІАЦІЙНІЙ ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ТЕХНІЦІ**

*Ухвалено вченою радою університету
як навчальний посібник*

**Дніпропетровськ
РВВ ДНУ
2011**

УДК 669.71: 629.7

К17

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Г.І. Сокол
д-р техн. наук, проф. В.Є. Хричіков

К 17 Калініна, Н.Є. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці [Текст]: навч. посіб. /Н.Є. Калініна, О.В. Бондаренко. – Д.: РВВ ДНУ, 2011. – 64 с.

Вступ

Застосування алюмінієвих сплавів досить поширене сьогодні й має великі перспективи подальшого розвитку. Ці сплави складають основу багатьох конструкцій, використовуються в провідних галузях техніки – в авіації, ракетно-космічній і атомній техніці. Нові сплави створюють, спираючись на теоретичні відкриття й узагальнення, на результати вирішення численних технічних проблем, їх застосування зумовлює значний прогрес у різних галузях науки і техніки.

Алюміній і його сплави почали використовувати як конструкційні матеріали у 20–30-х рр. ХХ ст. в авіаційній та автомобільній промисловості. Цей період став епохою масового виробництва, коли технічно складні вироби сходили з конвеєрів десятками, сотнями тисяч і мільйонами, досить згадати випуск мільйонів автомобілів і сотень тисяч літаків під час Другої світової війни. Передусім виробляли термічно зміцнювані деформовні й ливарні алюмінієві сплави, такі як дюралюміній і силуміни. У повоєнну добу набула свого розвитку ракетно-космічна промисловість і значне поширення дістали термічно не зміцнювані деформовні сплави алюмінію з магнієм, які мали гарну зварюваність і корозійну стійкість до компонентів ракетного палива. Термічно зміцнювані алюмінієві сплави застосовували також у суднобудуванні й атомній промисловості. Нанесення покриттів з алюмінію дозволило істотно підвищити корозійну стійкість сталевих конструкцій різного призначення. І нині використовують різноманітні предмети побуту, виготовлені з алюмінію і його сплавів, у першу чергу посуд.

У 70-х р. ХХ ст. було усвідомлено необхідність випереджального розвитку матеріалів порівняно з конструкціями, у яких можна використовувати ці матеріали, підвищено вимоги до матеріалів. На додаток до наявних термічно зміцнюваних алюмінієвих сплавів систем $Al-Cu-Mn$, $Al-Cu-Zn-Mn$, $Al-Si$ і термічно не зміцнюваних сплавів системи $Al-Mg$ було розроблено сплави, леговані літійом і скандієм. Ці сплави набули значного поширення в першу чергу в авіаційній та ракетно-космічній техніці. Нині існують перспективи їх упровадження в автомобілебудування й інші галузі техніки. Нові сплави мають міцнісні характеристики, відповідні найкращим показникам дисперсно-зміцнюваних алюмінієвих сплавів, і гарну зварюваність. Крім того, сьогодні розробляються принципово нові технології обробки матеріалів, що дозволяють значно поліпшити їх властивості.

Алюміній слушно називають металом ХХІ ст. Поєднання легування та мікролегування алюмінієвих сплавів рідкісноземельними елементами й різними хімічними речовинами та сучасних технологій обробки матеріалів дозволяє значно підвищити їх міцнісні характеристики й підвищити їх конкурентоспроможність відносно сталей і титанових сплавів.

1. Основні фізико-механічні властивості алюмінію

Алюміній належить до легких кольорових металів (густина 2698 кг/м^3) із невисокою температурою плавлення (660°C), має кубічну гранецентровану решітку й стійкість до поліморфних перетворень. Питома теплоємність і прихована теплота плавлення алюмінію значно вищі порівняно з іншими металами (табл. 1). З огляду на це для плавки алюмінію і його сплавів потрібна велика кількість теплоти. Метал має високу теплопровідність і електричну провідність, що складає 60% цих значень для міді. Чистий алюміній – м'який метал із невисокою міцністю; у литому стані має такі механічні властивості: $\sigma_B \approx 90 \text{ МПа}$; $\sigma_T \approx 35 \text{ МПа}$; $\delta = 45 \%$; $HB 25$; $E = 71 \text{ ГПа}$.

Алюміній – хімічно активний метал. В атмосфері він легко покривається тонкою й щільною оксидною плівкою, яка захищає поверхню від подальшого окиснення. Питомі об'єми оксиду і металу відрізняються незначно. Тому оксидна плівка має добре зчеплення з металом і малопроникна для інших газів. Завдяки захисній дії оксидної плівки алюміній має високу корозійну стійкість в атмосферних умовах і в середовищі багатьох органічних кислот; у лугах швидко розчиняється. Велика поширеність у земній корі (8,8 %), наявність зручних для розробки родовищ руд і створення надійної технології одержання металу з руди поставили алюміній на перше місце серед кольорових металів за значущістю та обсягом застосування в сучасному машинобудуванні та ливарному виробництві.

Первинний алюміній випускають у вигляді зливків і маркують відповідно до ГОСТ 11069-74 залежно від чистоти. Виділяють 3 групи алюмінію: особливої чистоти (вміст домішок менший 0,001 %); високої чистоти (вміст домішок 0,005 – 0,05 %); технічної чистоти (вміст домішок 0,15 – 1,0 %). Метал маркують буквою А й числом, що вказує на вміст алюмінію. Так, алюміній А85, А7 і А0 містить 99,85, 99,70 і 99,0 % Al відповідно (0,15, 0,30, 1,00 % – домішки).

Таблиця 1. Фізичні властивості промислових кольорових металів

Властивості	Метал					
	Be	Mg	Al	Ti	Ni	Cu
Атомний номер	4	12	13	22	28	3,29
Атомна маса	9,013	24,32	26,981	47,88	58,7	63,54
Густина за температури 20°C , кг/м^3	1847	1737	2698	4507	8897	8940
Температура плавлення, $^\circ\text{C}$	1287	650	660,24	1668	1455	1083

Властивості	Метал					
	Be	Mg	Al	Ti	Ni	Cu
Температура кипіння, °С	2450	1107	2520	3169	2822	2360
Атомний діаметр, нм	0,226	0,32	0,286	0,29	0,248	0,256
Прихована теплота плавлення, кДж/кг	1625	357	389,37	358,3	302	205
Прихована теплота випаровування, кДж/кг	34395	5498	10885	9790	6376	6340
Питома теплоємність за температури 20 °С, Дж/(кг·°С)	1826	1047,6	961,7	521	450	385
Питома теплопровідність, 20 °С, Вт/(м·°С)	2930	167	221,5	21,9	88,5	387
Коефіцієнт лінійного розширення за температури 25 °С, $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	12	26	23,3	9,2	13,5	16,8
Питомий електроопір за температури 20°С, мкОм·м	0,04	0,045	0,02767	0,58	0,0684	0,0172
Модуль нормальної пружності, ГПа	311,1	44,1	70,6	103	203	125
Модуль зсуву, ГПа	140	17,854	27	39,2	73	46,4

Основні домішки в алюмінії – залізо й кремній. Найбільш небезпечно залізо, що практично нерозчинне в алюмінії й навіть за дуже малого вмісту (меншого 0,005 %) спричиняє виділення інтерметаліду $FeAl_3$, що має голчасту форму й тому знижує пластичність алюмінію і його сплавів. Гранично допустимий вміст заліза в ливарних сплавах залежить від способу лиття. У випадку лиття в піщані форми допускають 0,5 – 1,0 % Fe. У разі лиття в кокіль у зв'язку з більш високою швидкістю охолодження забезпечується деяке здрібнювання включень $FeAl_3$, тому гранично допустимий вміст заліза може бути підвищено до 0,8 – 1,4 %. Кремній у

ливарних сплавах, як правило, не робить шкідливого впливу. Звичайно його використовують як основний або допоміжний легуючий елемент.

Особливо сильно знижують електроопір алюмінію *Mn*, *V*, *Cr* (рис. 1). Алюміній – парамагнітний матеріал. Модуль Юнга алюмінію складає 70000МПа, що значно менше, ніж у сталей.

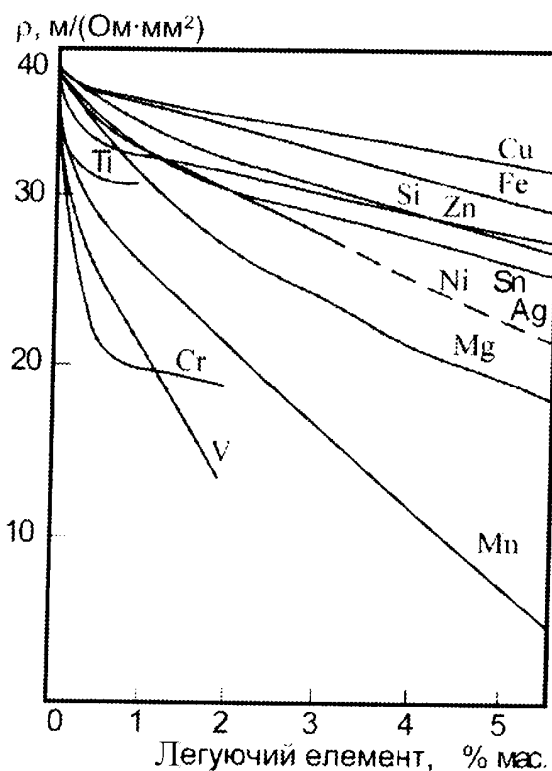


Рис. 1. Графік впливу домішок і легуючих елементів на електроопір алюмінію

Розчинність водню в алюмінії збільшується з підвищенням температури й складає 0,002 см³/100 г за температури 350 °С. Під час плавлення алюмінію розчинність водню в ньому різко підвищується до 0,6 см³/100 г за температури 1000 °С. З азотом розплавлений алюміній взаємодіє за температур, вищих 700 – 800 °С.

2. Легуючі елементи в сплавах алюмінію

Багато металів мають однакову з алюмінієм кристалічну решітку але через несприятливий об'ємний фактор або велике розходження в електронній будові не утворюють з алюмінієм неперервних твердих розчинів. Тугоплавкі перехідні матеріали з великим значенням температурного фактора n_T утворюють з алюмінієм діаграми перитектичного типу з малим значенням C_L , (*Ti*, *V*, *Cr*, *Zr*, *Nb*, *Mo*, *W*, *Re*, *Hf*, *Ta*). Розшарування в рідкому стані в алюмінієвих сплавах – рідкісне явище. Основним типом взаємодії є утворення евтектик з різним положенням точок C_P і C_E .

Виділено 7 елементів, що потенційно можуть бути основними легуючими елементами в алюмінієвих сплавах (табл. 2). Усі вони утворюють з алюмінієм системи евтектичного типу.

Зокрема, цинк відрізняється високою розчинністю у твердому алюмінії, є недефіцитним елементом, і тому його використовують як основний або допоміжний легуючий елемент, головним чином для твердорозчинного зміцнення ливарних сплавів. Однак через мале значення об'ємного фактора й відсутність інтерметалідів у подвійних сплавах *Al-Zn* додавання цинку не може забезпечити значного зміцнення.

Основні легуючі елементи в алюмінієвих сплавах – це *Mg, Cu, Si*. Утворення інтерметалідів у сплавах *Al – Cu, Al– Mg* і *Al – Mg – Si*, «зручне» розташування евтектики в сплавах *Al–Si*, істотна й змінна розчинність елементів у твердому алюмінії в сплавах *Al – Cu* і *Al – Mg* – усе це дозволяє застосовувати різні методи зміцнення сплавів, включаючи дисперсійне твердіння шляхом загартування й старіння.

До допоміжних легуючих елементів відносять перехідні метали, що утворюють з алюмінієм евтектичний або перитектичний блок і стійкі тугоплавкі інтерметаліди (*Mg, Cr, V, Ti, Zr, Mo, Ni, Nb*). Зазначені елементи використовують:

- 1) для додаткового зміцнення за розчинним типом;
- 2) пластифікування – підвищення технологічної пластичності сплаву за рахунок здрібнювання структури (багато науковців вважають, що інтерметаліди перехідних металів є для алюмінію модифікаторами I роду);
- 3) підвищення жароміцності в результаті утворення складних, термічно стійких інтерметалідних фаз і структури каркасного типу.

Таблиця 2. Взаємодія алюмінію з деякими елементами

Характеристика	Zn	Ag	Li	Mg	Ge	Cu	Si
$C_P, \%$	82,2	55,6	4,2	17,4	7,2	5,65	1,65
$C_E, \%$	95,0	70,5	9,0	33,0	63,0	33,0	11,7
$t_E, ^\circ\text{C}$	382	565	601	449	424	548	577
$\Delta t_E = t_{Al} - t_E, ^\circ\text{C}$	278	95	59	211	236	112	83
$K_P = C_P / C_E$	0,75	0,63	0,38	0,60	0,09	0,14	0,19
Хімічна сполука	Немає	Ag_2Al	LiAl	Mg_2Al_3	Немає	CuAl_2	Немає

Частину допоміжних легуючих елементів становлять елементи II – V груп періодичної системи, що мають незначну граничну розчинність у твердому алюмінії (*Na, K, Be, Ca, Sr, Ba, Bi, Cd*). Їх використовують в алюмінієвих сплавах у вигляді невеликих добавок (близько 0,2 %), головним чином для поліпшення технологічних властивостей. Через мале значення K_P добавки концентруються на границях зростаючих кристалів, блокують їх ріст і подрібнюють зерно. Крім того, усі вони (крім *Be*) мають нижчий

поверхневий натяг порівняно з алюмінієм, що також сприяє появі модифікувального ефекту. Найбільш ефективні модифікатори II роду для алюмінієвих сплавів – елементи з низьким поверхневим натягом – *Na, K, Sr, Ba*.

У промисловості застосовують велику кількість ливарних алюмінієвих сплавів. Звичайно їх класифікують за принципом спільності базової системи, що визначає основний комплекс властивостей: сплави *Al – Si, Al – Cu, Al – Mg, Al – Cu – Mg* (табл. 3). Можливість застосування того або іншого сплаву зумовлена насамперед механічними та експлуатаційними властивостями, а також технологічними властивостями й економічними характеристиками, що в багатьох випадках становлять вирішальний чинник. Міцнісні властивості ливарних алюмінієвих сплавів лежать у межах $\sigma_B = 150 - 450$ МПа, $\sigma_T = 90 - 250$ МПа, $\delta = 1-20$ %; максимальні робочі температури складають $300 - 350^\circ\text{C}$. Невисока густина ($2600 - 3200$ кг/м³) забезпечує хороший показник питомої міцності (відношення межі міцності до густини σ_B/ρ), що особливо важливе в таких галузях машинобудування, як авіація та космонавтика.

Таблиця 3. Хімічний склад і типові механічні властивості ливарних алюмінієвих сплавів

Основна система	Марка сплаву	Середній вміст елементів, %						Механічні властивості	
		Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Інші	σ_B , МПа	δ , %
Al-Si	АЛ2	11,5	–	–	–	–	–	140–180	1–6
	АЛ4	9,0	0,23	–	–	0,3 5	–	200–240	2–4
	АЛ9	7,0	0,30	–	–	–	–	160–230	1–5
	АЛ34 (ВАЛ5)	7,5	0,45	–	–	–	0,2 Ti	260–330	2–4
Al-Si-Cu	АЛ6	5,2	–	2,5	–	–	–	170–250	3–8
	АК4М4 (АЛ15В)	4,0	–	4,2	–	0,4 0	–	200–260	0,5–1,0
Доевтектичні сплави	АЛ5	5,0	0,5	11,2	–	–	–	160–230	0,5–1,0
	АЛ3	5,0	0,5	2,2	–	0,75	–	150–250	0,5–2,0
	АК5М7 (АЛ10В)	5,5	0,35	7,0	–	–	–	140–220	0,5–1,0
Евтектичні сплави	АЛ25	12,0	1,0	2,2	–	0,45	1,0 Ni 0,1 Ti	>190	0,5–1,0
	АЛ30	12,0	1,0	1,1	–	–	1,0 Ni	>200	0,5–1,0

Закінчення табл.3.

Основна система	Марка сплаву	Середній вміст елементів, %						Механічні властивості	
		Si	Mg	Cu	Zn	Mn	Інші	σ_B , МПа	δ , %
заевтек-тичні сплави	АК21М2 5Н2,5	21,0	0,35	2,5	–	0,30	2,5 Ni 0,3 Cr 0,2 Ti	180	0,5-1,0
Al–Si–Zn	АЛ11	7,0	0,2	–	9,5	–	–	180 – 250	1 – 3
Al–Cu	АЛ7	–	–	4,5	–	–	–	200 – 230	3 – 6
	АЛ19	–	–	4,9	–	0,8	0,2 Ti	300 – 360	4 – 8
Al–Cu–(Ni)	АЛ33 (ВАЛ11)	–	–	5,8	–	0,8	1,0Ni 0,1 Zr 0,2Ce	250 – 280	2 – 4
Al–Mg	АЛ8	–	–	4,5	–	–	0,27 Zr 0,07 Be	>290	3 – 6
	АЛ27	–	10,0	–	–	–	0,1 Ti	>320	12 – 16
	АЛ23	–	6,5	–	–	–	0,1Be 0,1 Zr	190 – 230	4 – 6
	АЛ28	–	5,5	–	–	0,70	0,1 Ti	200 – 220	4 – 6
Al–Mg–(Si)	АЛ13	1,0	5,0	–	–	0,25	–	170 – 200	3 – 5
	АЛ22	1,0	11,7	–	–	–	0,1 Ti 0,05 Be	180 – 260	1–3
Al–Cu–Mg–(Ni)	АЛ1	–	1,5	4,1	–	–	2,0 Ni	180 – 230	0,5 – 1,5
	АЛ21	–	1,0	5,3	–	0,20	3,1Ni 0,15 Cr	180 – 240	0,5 – 1,0
Al–Mg–Zn	АЛ24	–	1,7	–	4,0	0,35	0,15 Ti	220 – 300	2 – 3

3. Структура й властивості литих алюмінієвих сплавів

Структура і властивості деформованих напівфабрикатів залежать від якості вилівка, яку визначають форма й розміри зерен та їх внутрішня будова. Зерно являє собою дендрит, який росте з одного центру кристалізації. Зерна за формою бувають рівновісними, стовпчастими і віяловими.

Внутрішню будову зерна зумовлюють форма і розміри гілок дендрита, а також форма й розміри хімічних сполук. Зовнішній вигляд зерна не вказує на характер внутрішньої будови. Незалежно від розміру зерна гілки дендритів можуть бути як тонкими, так і товстими, а відповідно до цього частинки хімічних сполук – як дрібними так і великими. Чим тонші гілки дендриту й чим дрібніші частинки хімічних сполук, тим тонша внутрішня структура (рис. 2). Рівень механічних властивостей у литому й термічно обробленому стані визначають внутрішня структура зерна, його розміри та форма. Таким чином, більш тонка внутрішня структура підвищує міцність і пластичність.

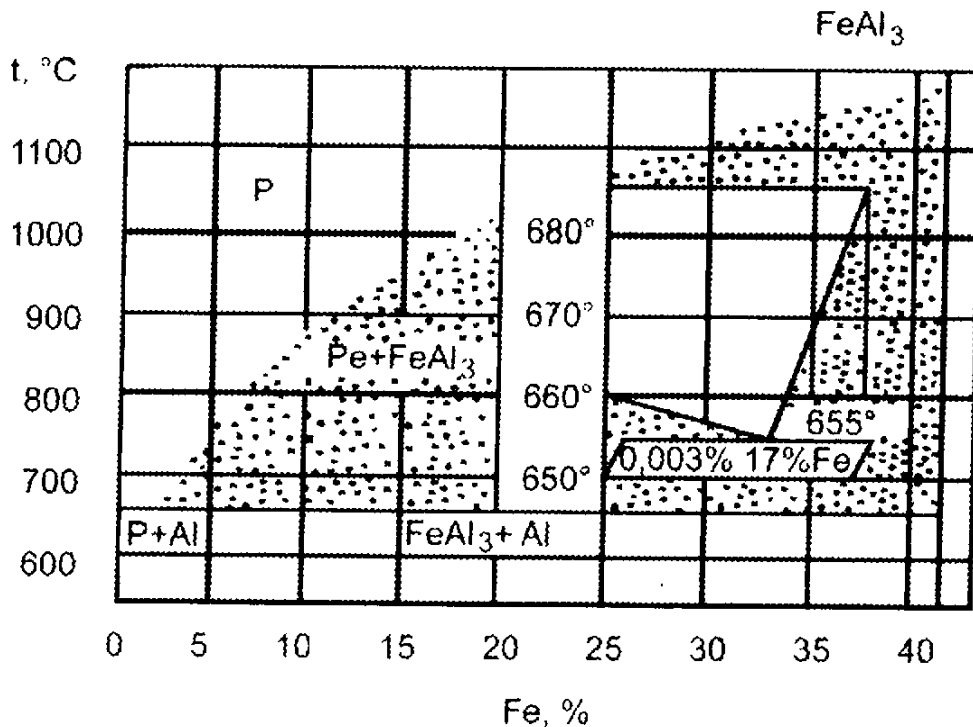


Рис. 2. Частина діаграми стану Al–Fe

Розмір зерна залежить від низки факторів. Зерно подрібнюється за більш низької температури лиття, у випадку введення в розплав тугоплавких металів, які утворюють інтерметалічні сполуки, що кристалізуються першими. Збільшується зерно в разі перегріву розплаву, за високих температур лиття й підвищеної чистоти розплаву. У результаті процесів, що супроводжують кристалізацію вилівоків з алюмінієвих сплавів у реальних промислових умовах, їх структура виходить нерівноважною.

Основні особливості нерівноважної литої структури виявляються в такому:

1. Легуючі елементи й домішки нерівномірно розподілені по об'єму дендритів твердого розчину. Периферійні зони дендритних областей збагачені елементами, що знижують температуру плавлення алюмінію (*Cu, Zn, Mg, Si, Mn*), і збіднені елементами, які підвищують температуру плавлення (*Cr, Zr, Ti*) (рис. 3).

2. У литому стані присутні фази, що не повинні бути за рівноважної кристалізації: фази нерівноважної евтектики та первинні інтерметаліди.

3. Фази, що взаємодіють з алюмінієм за евтектичною реакцією, розташовані по границях дендритних областей, а ті, що взаємодіють з алюмінієм за перитектичною реакцією, – у центрі зерна.

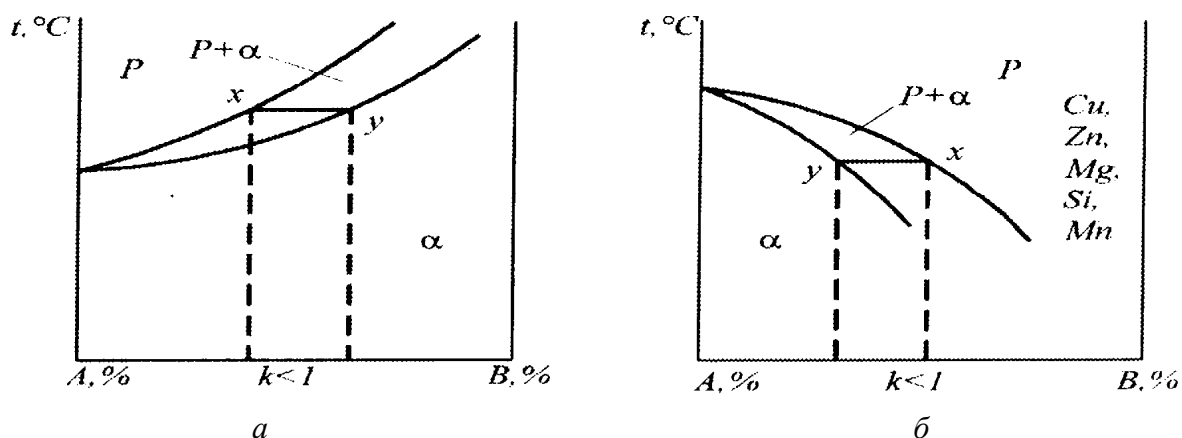


Рис. 3 – Діаграма рідкої й твердої фаз під час кристалізації:
а – рідка фаза; б – тверда фаза

4. Гаряча і холодна обробка алюмінієвих сплавів тиском

Алюміній і його сплави відносять до пластичних металевих матеріалів. З алюмінієвих сплавів виготовляють деформовані напівфабрикати: фольгу, листи, плити, прутки, профілі й труби, ребристі панелі, ковані та штамповані заготовки, дріт. Заготовками служать виливки, одержані методом безперервного лиття. У процесі виробництва напівфабрикатів застосовують способи гарячої та холодної обробки тиском. Прутки, профілі, панелі, товстостінні труби з алюмінієвих сплавів виготовляють пресуванням нагрітого до температури 350 – 450 °С вилівка через матрицю на гідравлічних пресах. Гарячою деформацією, куванням і штампуванням на молотах і пресах одержують ковані й штамповані заготовки деталей складної конфігурації.

У ході виготовлення листів, тонкостінних труб, дроту після попередньої гарячої деформації заготовку піддають холодній деформації – прокатуванню або волочінню. Пластична деформація металу під час обробки тиском змінює структуру алюмінію й поліпшує його властивості.

Для структури алюмінію та алюмінієвих сплавів, підданих холодній або гарячій пластичній деформації, характерні такі особливості:

1. Геометричне орієнтування зерен.
2. Кристалографічне орієнтування, або кристалографічна текстура деформації.
3. Підвищена щільність дислокацій:
 - відпалений алюміній – 10^7 см^{-2} ;
 - деформований алюміній – $10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$.
4. Відсутність мікро- і макродефектів литої структури:
 - різнозернистість;
 - ліквация;
 - усадочна і газова пористість;
 - оксидні й шлакові включення.

Деформований метал більш міцний і однорідний, ніж литий.

Алюмінієві сплави дуже пластичні. Їх ефективно зміцнюють шляхом холодної деформації. За збільшення ступеня деформації до 30 – 40 % σ_B підвищується в 1,5 разу, $\sigma_{0,2}$ – у 2 рази. Основна причина деформаційного зміцнення – підвищення щільності дислокацій (рис. 4, 5).

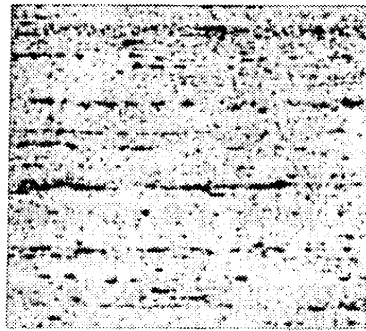


Рис. 4. Мікроструктура деформованого алюмінієвого сплаву, $\times 100$

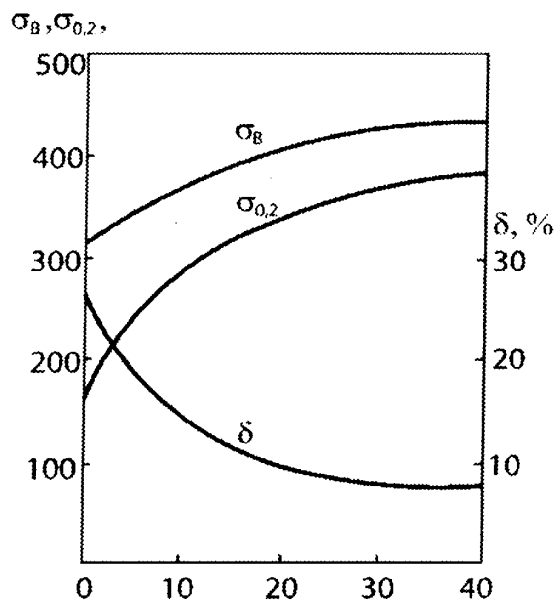


Рис. 5. - Зміна механічних властивостей сплаву АМг6 залежно від ступеня холодної деформації

5. Класифікація алюмінієвих сплавів

Для одержання алюмінієвих сплавів з різними властивостями алюміній легують іншими металами. Найчастіше як легуючі елементи використовують *Cu, Mg, Mn, Zn, Si*, а останнім часом – *Li* і *Sc*.

У промисловості застосовують більш ніж 50 марок алюмінієвих сплавів.

Залежно від способу одержання напівфабрикатів алюмінієві сплави поділяють на деформовані й ливарні.

Ливарні сплави застосовують для фасонного лиття. Крім того, методом порошкової металургії виготовляють спечені алюмінієві порошки (САП) і спечені алюмінієві сплави (САС).

Деформовні й ливарні сплави поділяють на термічно зміцнювані та не зміцнювані термічною обробкою (рис. 6).

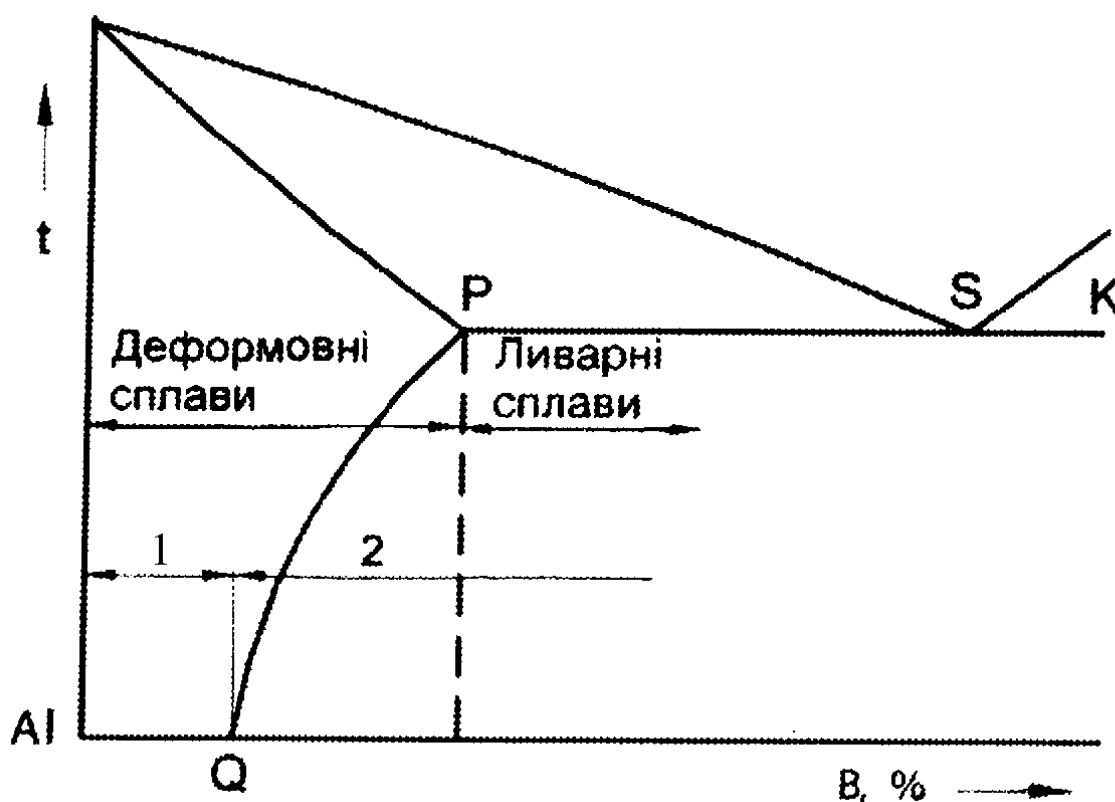


Рис. 6. Схема класифікації алюмінієвих сплавів за діаграмою стану:
1 – сплави, термічно не зміцнювані; 2 – сплави, зміцнювані термічною обробкою

Термічного зміцнення можна досягти загартуванням із наступним природним або штучним старінням. Усі сплави, використовувані в промисловості, можна поділити на системи, у яких основні легуючі елементи будуть визначати типові для даної системи фізичні та хімічні властивості.

6. Принципи маркування алюмінієвих сплавів

У маркуванні алюмінієвих сплавів тривалий час не було єдиної системи. Є марки, які характеризують склад сплаву, наприклад: АМг2 ($Al - Mg - 2\%$), АМц ($Al - Mn$). Інші марки відбивають технології одержання виробів. Так, у сплавах АЛ2, АЛ4, АЛ7 буква Л показує, що сплав ливарний; цифри після букв – порядкові номери сплаву. АК4, АК6 – алюмінієві сплави для кування. Марки багатьох сплавів містять вказівку на організацію-розробника: ВАЛ 10, ВАЛ 14 – ливарні сплави, розроблені у Всеросійському інституті авіаційних матеріалів (ВІАМ), ВАД-1 – деформовний сплав, розроблений тією ж організацією.

У 70-х р. ХХ ст. було введено єдину цифрову систему маркування. Перша цифра вказує на основу сплаву (для алюмінію – 1), друга цифра означає систему легування, третя й четверта – порядковий номер сплаву, при цьому для деформовних сплавів остання цифра – 0 або непарне число, для ливарних сплавів – парне число. Стосовно ливарних сплавів ГОСТ 1583-89 передбачає буквено-цифрове маркування, аналогічне для сталей: буква А – алюміній, наступні букви – основні легуючі елементи (С – кремній, М – мідь, Мг – магній, Мц – марганець, Н – нікель, Ц – цинк); цифри після букв показують середній вміст компонента у відсотках за масою. Букви Ч (чистий) або ОЧ (особливої чистоти) указують на підвищену чистоту сплавів за домішками заліза та кремнію. Класифікація алюмінієвих сплавів за фазовим складом більш загальна (табл. 4).

Легуючі елементи Cu , Mg і Si входять до більшості промислових сплавів. Незважаючи на те, що Si входить до складу всіх сплавів, 80% усіх технічних алюмінієвих сплавів належить до почетвереної системи $Al-Cu-Mg-Si$. У цій системі можуть утворюватися інтерметаліди Mg_2Si , $\theta(Al_2Cu)$ і $\beta(Al_3Mg_2)$.

У системі $Al-Cu-Mg$ утворюються 2 потрійні сполуки $S(Al_2CuMg)$ і $T(Al_6CuMg_4)$. У результаті в системі $Al-Cu-Mg$ можуть існувати фази: $Al - CuAl_2 - S$; $Al - S - T$ і $Al - T - Al_3Mg_2$.

У системі $Al - Mg - Si$ існують фази $Al - Al_3Mg_2 - Al_2Si$ і $Al - Mg_2Si - Si$.

Структуру сплавів $Al - Cu - Si$ визначають $\alpha-Al$ і фазами $CuAl_2$ і Si . У сплавах $Al - Cu - Mg - Si$ можуть існувати такі фази:

$\alpha-Al - Al_2Cu - Si - W$; $\alpha-Al - CuAl_2 - W$; Mg_2Si ; $\alpha-Al - Al_2Cu - Mg_2Si - Si$; $\alpha-Al - Si - Mg_2Si - T$; $\alpha-Al - T - Mg_2Si - Al_3Mg_2$ і $\alpha-Al - W - Mg_2Si - Si$.

Властивості сплавів зумовлені їх фазовим складом. Усі інтерметалідні фази за зменшенням зміцнювального ефекту в процесі термічної обробки можна розташувати так:

– сумарний ефект загартування й природного старіння забезпечують Si , Al_2Cu , Mg_2Si ;

– сумарний ефект загартування й штучного старіння забезпечують W , Si , $CuAl_2$, Mg_2Si .

Фази T , Al_3Mg_2 і Si не дають у ході термічної обробки ефекту зміцнення. Сполука Mg_2Si – дуже стійка й не розчиняється під час термообробки.

Сплави систем $Al - Cu$, $Al - Cu - Mg$ (Д20, В95, Д1, Д18, Д16, Д19, ВАД1) мають основні зміцнювальні фази $CuAl_2$ і Si , а також Mg_2Si . Присутність Fe і Ni у системі $Al - Cu - Mg$ призводить до утворення сполук Al_7Cu_2Fe та Al_6Cu_3Ni , нерозчинних в Al й таких, що зменшують ефект від термічної обробки.

До системи $Al - Mg - Si$ відносять сплави типу авіалю (АВ, АД31) та силуміну АК9ч (АЛ4). Сплави АД31, АК9ч (АЛ4) не містять Cu , і їх фазовий склад такий: $\alpha-Al + Mg_2Si + Si$. Вони термічно зміцнюювані.

Типові представники сплавів системи $Al - Cu - Mg - Si$ – це АК6 і АК8, вони містять зміцнювальні фази W і $CuAl_2$.

Таблиця 4. Хімічний склад (%) і типові механічні властивості деформованих алюмінієвих сплавів після загартування й старіння

Сплав	Cu	Mg	Mn	Si	Інші елементи	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\delta, \%$
						МПа		
<i>Дуралюміни</i>								
Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7	–	250	410	15
Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	0,3–0,9	0,5	–	380	520	11
<i>Сплав авіаль</i>								
АВ	0,1–0,5	0,45–0,9	0,15–0,35 (або Cr)	0,5–1,2		120	220	22
<i>Високоміцні алюмінієві сплави</i>								
В95	1,4–2,0	1,8–2,8	0,2–0,6	0,5	5 – 7 Zn; 0,1–0,25 Cr	530–550	560–600	8
В96	2,2–2,8	2,5–3,2	0,2–0,5	–	7,6–8,6 Zn; 0,1–0,25 Cr	630	670	7
<i>Кувальні алюмінієві сплави</i>								
АК6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7–1,2	–	300	420	13
АК8	3,9–4,8	0,4–1,0	0,4–1,0	0,6–1,2	–	380	480	10
<i>Жароміцні алюмінієві сплави</i>								
АК4-1	1,9–2,5	1,4–1,8		0,35	0,8 – 1,3 Fe; 0,8 – 1,3 Ni; 0,02 – 0,1 Ti	280	430	13
Д20	6-7	–	0,4-0,8	0,3	0,1–0,2 Ti	250	400	12

Примітка. Буква Д означає сплав типу дуралюмін, А в початку марки – алюмінієвий сплав: (АД) АД1 – технічний алюміній; АК – алюмінієвий кувальний сплав. Нерідко на початку марки ставиться буква В - високоміцний. Після умовного номера ідуть позначення, що характеризують стан сплаву. Буква М – м'який (відпалений); Т – термічно оброблений (загартування й природне старіння); Н – нагартований; П – напівнагартований і т.д. Наприклад Д16М – дуралюмін відпалений, Д16ТН – дуралюмін загартований, природно зістарений і додатково нагартований.

7. Термічна обробка алюмінієвих сплавів

Термічна обробка – один зі способів впливу на структуру та властивості литих і деформованих заготовок. Значного поширення набули 3 основні види термічної обробки алюмінієвих сплавів: відпал; загартування; старіння.

Відпал виливків або деформованих заготовок застосовують у тих випадках, коли нерівноважний стан сплаву обумовлює появу зниженої пластичності. В алюмінієвих сплавах можливі 3 види нерівноважних станів:

- 1) властивий литим сплавам;
- 2) такий, що виникає в результаті пластичної деформації, особливо холодної;
- 3) той, що виникає в процесі попередньої обробки (загартування або старіння).

Усі види нерівноважних структур можна усунути відпалом, причому в усіх випадках після відпалу підвищується пластичність. Розрізняють 3 види відпалу:

- 1) гомогенізаційний відпал, або гомогенізація;
- 2) рекристалізаційний відпал деформованих виробів після обробки тиском;
- 3) гетерогенізаційний відпал термічно зміцнених напівфабрикатів з метою зниження міцності.

Гомогенізація – вид відпалу, застосовуваний під час виготовлення деформованих заготовок. Гомогенізація вилівка – термічна обробка в технологічному процесі, що дозволяє поліпшити властивості деформованих заготовок.

Режим гомогенізації й гетерогенізаційного відпалу схематично показаний на рис. 7. Гетерогенізаційний відпал проводять за температури мінімальної стійкості твердого розчину, що забезпечує його швидкий розпад (витримка 1–2 год). Після такої обробки відливок зберігає свій структурний стан, що визначає підвищення технологічності в ході пресування.

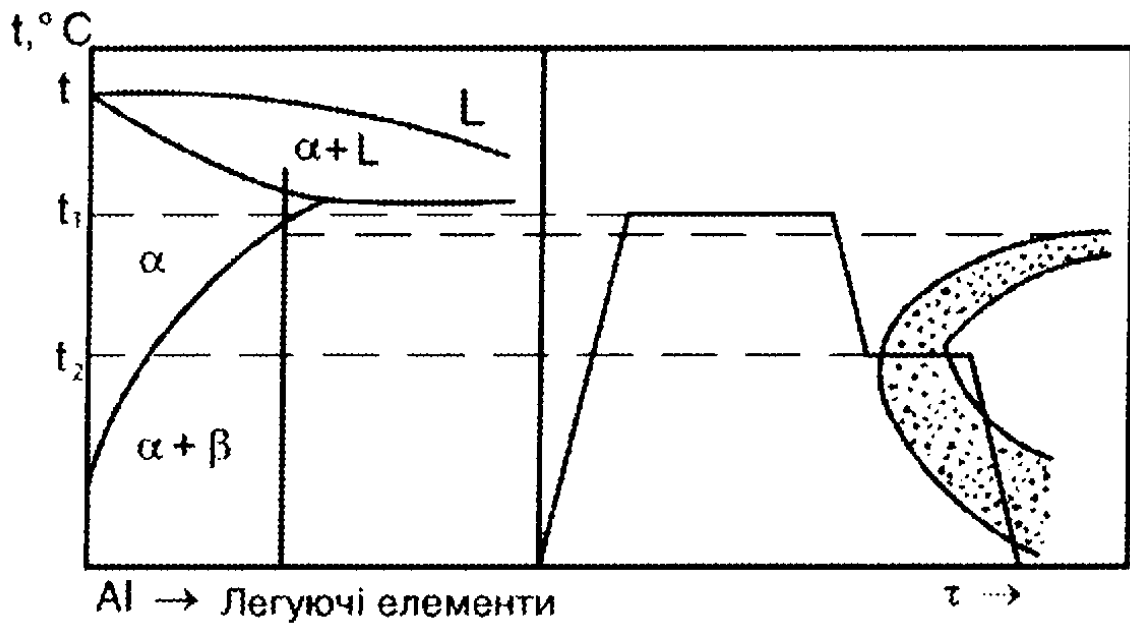


Рис. 7. Схема термічної обробки після гомогенізації:
 t_1 – температура гомогенізації; t_2 – температура мінімальної стійкості твердого розчину

Рекристалізаційний відпал поширений як проміжна термічна обробка між операціями холодної деформації або між гарячою та холодною деформацією.

У процесі нагрівання деформованих металів і сплавів до температури початку рекристалізації, що для технічно чистих металів складає $0,4 T_{пл}$ (а для сплавів ще більше), починається ріст нових зерен. Усі властивості деформованого металу в результаті рекристалізації змінюються, тобто міцність і твердість знижуються, а пластичність зростає (рис.8).

Розміри рекристалізованих зерен залежать від таких основних факторів:

- 1) ступінь деформації перед відпалом;
- 2) температура нагрівання;
- 3) швидкість нагрівання;
- 4) час витримки.

Величина критичного ступеня деформації для алюмінієвих сплавів коливається в широких межах, для алюмінію вона складає 1–3 %, а для сплавів – 4–10 %.

Відпал повинен забезпечувати повний розпад твердого розчину й одержання за кімнатної температури фазового стану, близького до рівноважного. Температура відпалу має задовольняти такі умови:

- 1) твердий розчин повинен мати невисокий вміст легуючих елементів;
- 2) дифузійні процеси мають проходити швидко за температури 350–420 °С.

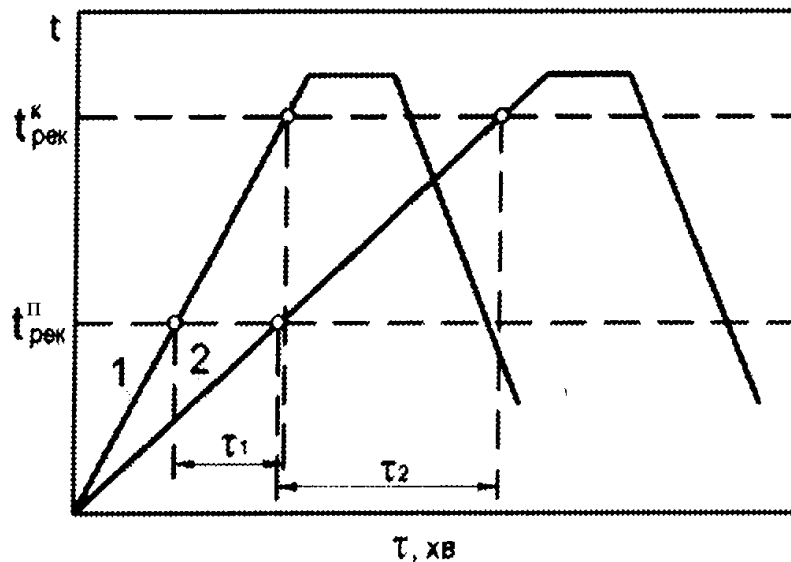


Рис. 8. Схема впливу швидкості нагрівання на температуру рекристалізації сплаву
 1 – швидкісне нагрівання; 2 – звичайне нагрівання

Загартування здійснюють з метою одержати в сплаві гранично нерівноважний фазовий склад і застосовують для сплавів, у яких відбуваються фазові перетворення у твердому стані. Для алюмінієвих сплавів характерний 1 вид фазових перетворень: під час нагрівання інтерметаліди розчиняються в алюмінії, а під час охолодження знову виділяються з твердого розчину.

Таким чином, загартування застосовне тільки для алюмінієвих сплавів, що містять елементи, розчинність яких у твердому алюмінії зростає з підвищенням температури (*Cu, Mn, Si, Zn, Li*), причому в кількості, що перевищує розчинність за кімнатної температури. Загартування алюмінієвих сплавів полягає в нагріванні сплаву до температури, за якої надлишкові інтерметалідні фази повністю або переважно розчиняються в алюмінії, у витримці за цієї температури та швидкому охолодженні до кімнатної температури для одержання пересиченого твердого розчину. Наприклад, температуру гартування сплавів системи *Al – Cu* (рис.9) можна визначити лінією *abc*, яка проходить вище лінії граничної розчинності для сплавів, які містять менше 5,6% *Cu*, і нижче евтектичної лінії (548 °C) для сплавів із великою кількістю міді. У процесі нагрівання під загартування сплавів, що містять до 5,6% *Cu*, надлишкова фаза *CuAl₂* повністю розчиняється, і за наступного швидкого охолодження фіксується тільки пересичений α -твердий розчин, що містить стільки міді, скільки її знаходиться в сплаві.

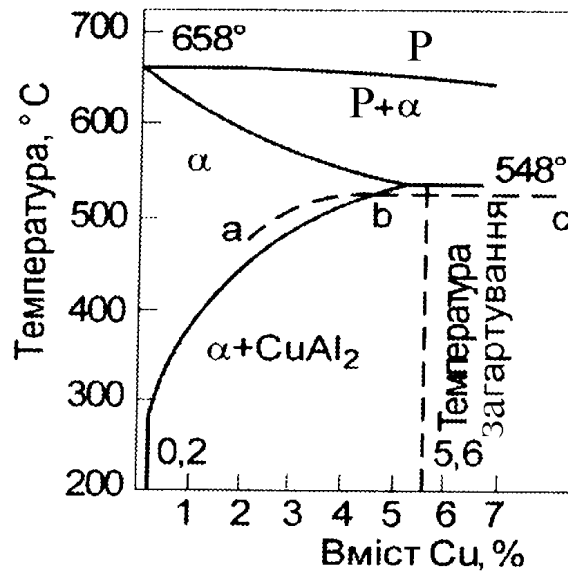


Рис. 9. Діаграма стану Al - Cu.

Пунктирна лінія *abc* показує температури нагрівання для загартування сплавів Al - Cu

За вмісту міді понад 5,6% у структурі сплавів після загартування будуть наявні пересичений α -твердий розчин складу, що відповідає точці *b* на діаграмі стану (рис. 9), і не розчинені в ході нагрівання кристали сполуки $CuAl_2$, що входять в евтектику. Час витримки за температури гартування, необхідний для розчинення інтерметалідних фаз, залежить від структурного стану сплаву, типу печі й товщини виробу. Листи, плити, прутки, штаби товщиною 5–150 мм в процесі нагрівання в селітрових ваннах витримують 10–80 хв, а у випадку нагрівання в електропечах із примусовою циркуляцією повітря – 30–210 хв. Витримка фасонних виливків за температури гартування більш тривала – 2–15 год. Охолодження деформованих сплавів у ході загартування проводять у холодній воді, а фасонних виливків – у підігрітій воді (температура 50 – 100°C), щоб уникнути їх жолоблення та утворення тріщин. Після загартування сплави, які мають невисоку міцність, набувають високої пластичності.

Старіння алюмінієвих сплавів полягає у витримці за кімнатної температури протягом кількох діб (природне старіння) або протягом 10–24 год за підвищеної температури (штучне старіння). У процесі старіння відбувається розпад пересиченого твердого розчину, що супроводжується зміцненням сплаву. Розпад пересиченого розчину, у решітках якого атоми міді розташовані статистично нерівномірно, відбувається за кілька стадій залежно від температури та тривалості старіння. У випадку природного старіння (за температури 20°C) або низькотемпературного штучного старіння (нижче 100–150°C) розпад твердого розчину з виділенням надлишкової фази не спостерігається; за цих температур атоми міді переміщуються тільки всередині кристалічних решіток α -твердого розчину на досить малі відстані й

скупчуються по деяких площинах, формуючи двовимірні пластинчасті утворення або диски – зони Гінье – Престона (ГП-1) (рис. 10,*а*). Зони ГП-1 довжиною кілька десятків ангстремів (30 - 60 \AA) і товщиною 5 – 10 \AA більш-менш рівномірно розподілені в межах кожного кристала. Концентрація міді в зонах ГП-1 менша, ніж у CuAl_2 (54 %).

Якщо сплав після природного старіння протягом короткого часу (кілька хвилин) нагріти до температури 230 – 270 °С і потім швидко охолодити, то зміцнення буде цілком усунуто, і властивості сплаву відповідатимуть свіжозагартованому стану. Це явище одержало назву повернення. Зміцнення у випадку повернення пов'язано з тим, що зони ГП-1 за вищевказаних температур виявляються нестабільними й тому розчиняються у твердому розчині, а атоми міді знову рівномірно розподіляються по об'єму кожного кристала твердого розчину, як і після загартування. Під час наступної витримки сплаву за кімнатної температури знову відбувається утворення зон ГП-1 і зміцнення сплаву. Однак після повернення й подальшого старіння погіршуються корозійні властивості сплаву, що унеможлиблює застосування повернення з практичною метою. Тривала витримка за температури 100°С або витримка протягом декількох годин за температури 150 °С призводить до утворення зон Гінье–Престона більшої величини (товщина 10–40 \AA и діаметр 200–300 \AA) з упорядкованою структурою, відмінної від α -твердого розчину. Концентрація міді в них відповідає вмісту її в CuAl_2 . Такі зони прийнято називати зонами ГП-2 (рис. 10б).

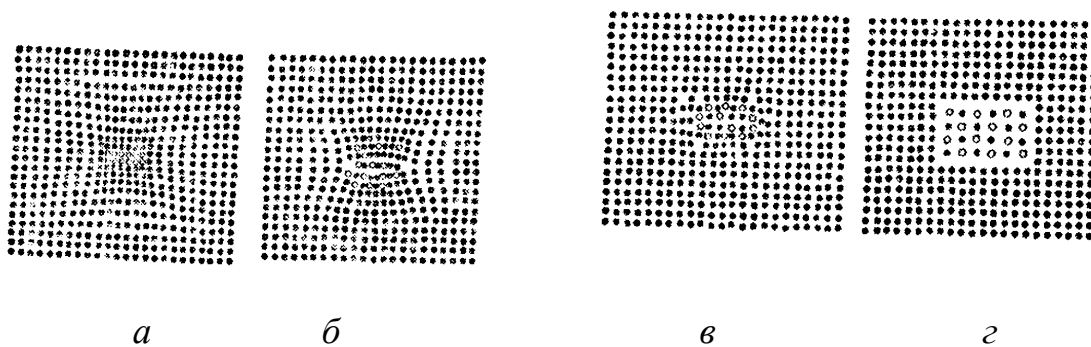
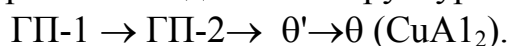


Рис. 10. Схема виділення частинок CuAl_2 з α -твердого розчину в ході старіння
а – ГП-1 зони; *б* – ГП-2 зони; *в* – фаза θ' (тетрагональна); *г* – фаза CuAl_2 (θ) (кубічна)

Із підвищенням температури старіння процеси дифузії, (а отже, і процеси структурних перетворень) проходять швидше. Витримка протягом декількох годин за температури 150–200°С зумовлює утворення в місцях розташування зон ГП-2 дисперсних (тонкопластинчастих) частинок проміжної θ' -фази (рис.10, *в*). Ця фаза відрізняється за хімічним складом від стабільної зони θ (CuAl_2) і має відмінну від наявної в останньої кристалічну решітку. Підвищення температури до 200 – 250°С приводить до коагуляції θ' -фази й утворення стабільної θ -фази (рис. 10, *г*).

Таким чином, у випадку природного старіння утворюються лише зони ГП-1. У разі штучного старіння послідовність структурних змін така:



Ця загальна схема розпаду пересиченого твердого розчину в сплавах *Al-Cu* слушна й для інших сплавів. Розходження зводиться лише до того, що в різних сплавах неоднаковий склад і будова зон, а також фаз, які утворюються.

Під час вибору режиму старіння (температури й тривалості), як правило, виходять з умов забезпечення максимальної міцності. Температура старіння для досягнення максимальної міцності для різних алюмінієвих сплавів коливається від 20 до 200 °С. Існують загальноприйняті умовні позначення режимів термічної обробки:

– Т1 – нагрівання до температури 175±5 °С 5–17 год. Застосовується для деталей середньої навантаженості;

– Т2 – нагрівання до 300±10 °С 2–4 год;

– Т4 – нагрівання під загартування до 535±5 °С, витримка 2–6 год, охолодження у воді з температурою 20–100 °С. Застосовують, коли необхідно досягти високої пластичності;

– Т5 – нагрівання під загартування до температури 535±5 °С, витримка 2–6 год, охолодження у воді та штучне старіння за температури 150±5 °С протягом 1–3 год. Режим ефективний для одержання деталей із підвищеними значеннями межі плинності й твердості;

– Т6 – нагрівання під загартування до 535±5 °С, витримка 2–6 год, охолодження у воді та штучне старіння за температури 200±5 °С протягом 2–5 год. Застосовують, щоб одержати деталі з підвищеною міцністю;

– Т7 – нагрівання під загартування до 535±5 °С, витримка 2–6 год, охолодження у воді та штучне старіння при 200±5 °С, 3–5 год. Режим дозволяє одержати деталі з достатньою міцністю й високою стабільністю геометричних параметрів;

– Т8 – нагрівання під загартування до 535±5 °С, витримка 2–6 год, охолодження у воді та відпал за температури 225±10 °С протягом 3–5 год. Застосовують із метою досягти підвищеної пластичності й сталості розмірів деталей.

8. Деформовні сплави, не зміцнювані термічною обробкою

До сплавів, не зміцнюваних термічною обробкою, відносять сплави алюмінію з магнієм (АМг) і марганцем (АМц) (рис.11). Сплави алюмінію з 2–5% Mg мають високу пластичність ($\delta = 18\text{--}25\%$ за σ_B до 280 – 300 МПа). Ці сплави поступаються за міцністю дуралюмінію, однак їх стійкість проти корозії вища, ніж сплавів, що містять мідь. За більш високого вмісту магнію в сплаві (8 – 12 % Mg) можна одержати σ_B до 380 – 400 МПа, але при цьому пластичність їх сильно зменшиться. Сплави АМг не піддають термічній обробці, застосовують у відпаленому стані (табл. 5,6).

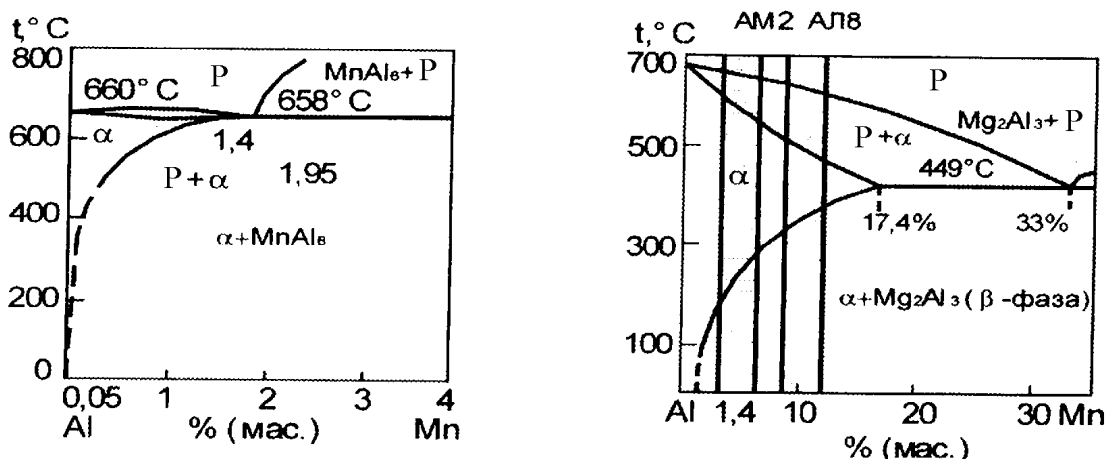


Рис. 11. Діаграми стану систем Al – Mn і Al – Mg

Сплави алюмінію з марганцем (1,0-1,6 % Mn) порівняно зі сплавами з магнієм мають меншу міцність ($\sigma_B = 120 - 200$ МПа при $\delta = 10 - 20$ %), але для них характерна дуже висока стійкість проти корозії (таб. 7).

Сплави АМг і АМц застосовують для одержання штампованих виробів, до яких ставлять вимоги гарної корозійної стійкості й зварюваності.

Таблиця 5. Хімічний склад промислових сплавів системи Al – Mg

Сплав	Вміст елемента, % мас.			
	Mg	Mn	Ti	Si
АМг1	1,1	–	–	–
АМг2	2,3	0,4	–	–
АМг3	3,5	0,45	–	0,65
АМг5	5,3	0,55	0,06	–
АМг6	6,3	0,65	0,06	–

Таблиця 6. Типові механічні властивості сплавів системи Al –Mg

Сплав	Обробка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ	σ_{-1} , МПа
АМг2М	Відпал	200	100	23	45	110
АМг2Н2	Неповний відпал	250	200	10	60	135
АМг3М	Відпал	220	110	20	50	–
АМг5М	Відпал	300	150	20	65	–
АМг6М	Відпал	350	170	20	70	130
АМг6Н	Зміцнений на 20 %	390	300	10	–	–
АМг6НПП*	Зміцнений на 30 %	430	350	8	–	–

* Сплав підвищеної міцності

Таблиця 7. Типові механічні властивості листів зі сплаву АМц

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
АМцМ	130	50	23	30
АМцН2	160	130	10	40

Зі сплавів системи $Al - Mg$ найчастіше в ракетно-космічній техніці застосовують сплав АМгб різного ступеня зміцнення. Ці сплави зварюють аргонодуговим, електронно-променевим і лазерним зварюванням, їх добре обробляти тиском та задовільно – різанням. Із даного сплаву виготовляють широкий асортимент напівфабрикатів: листи різної товщини; труби; пресовані профілі різного перерізу; ковані та штамповані заготовки. З огляду на високі технологічні властивості цей сплав придатний для виготовлення більшості елементів ракет-носіїв: днищ і обичайок баків; трубопроводів; сильфонів великого діаметра; шпангоутів; корпусів перехідних відсіків; аеродинамічних обтічників головних частин; деталей вузлів автоматики. В авіаційній техніці сплав АМгб застосовують в основному для виготовлення баків і трубопроводів. Висока корозійна стійкість дозволяє використовувати деталі зі сплаву АМгб у контакті з корозійно-активними компонентами палива, такими як азотний тетраоксид, застосовувати конструкції з нього в умовах вологої і морської корозії.

Недоліки сплаву АМгб – відносно невисока порівняно з термічно зміцнюваними алюмінієвими сплавами міцність, через яку необхідно збільшувати масу конструкцій.

Сплави системи $Al - Mg$, у тому числі й АМгб, удосконалюють за допомогою так званих синергетичних технологій обробки матеріалів. У цьому випадку метал піддають одночасному або послідовному впливу пластичної деформації й ультразвукових коливань, іноді в поєднанні з лазерним випромінюванням. У результаті в 2,0–2,5 разу зростає межа плинності і міцності, збільшується робота руйнування (опірність руйнуванню) за збереження пластичності.

Конкуренцію сплавам системи $Al - Mg$ складають сучасні сплави системи $Al-Cu-Mg$ (наприклад, 1201) і $Al-Cu-Zn-Mg$ (наприклад, 1915) зі зниженим вмістом цинку й підвищеним – магнію, а також сплави систем $Al-Mg-Sc$, $Al-Mg-Sc-Zr$ і $Al-Mg-Li$, що мають більш високу міцність і задовільну зварюваність. Для виготовлення аеродинамічних обтічників головних частин як альтернативу сплавам типу АМгб можна використовувати стільникові конструкції з обшивками з вуглепластика та стільниковим заповнювачем з алюмінієвої фольги.

9. Сплави на основі системи Al – Cu

Для аналізу структуроутворення в ливарних сплавах системи Al–Cu застосовують область діаграми стану від алюмінію до першої хімічної сполуки θ ($CuAl_2$), яка утворюється за вмісту міді близько 50% (рис.12).

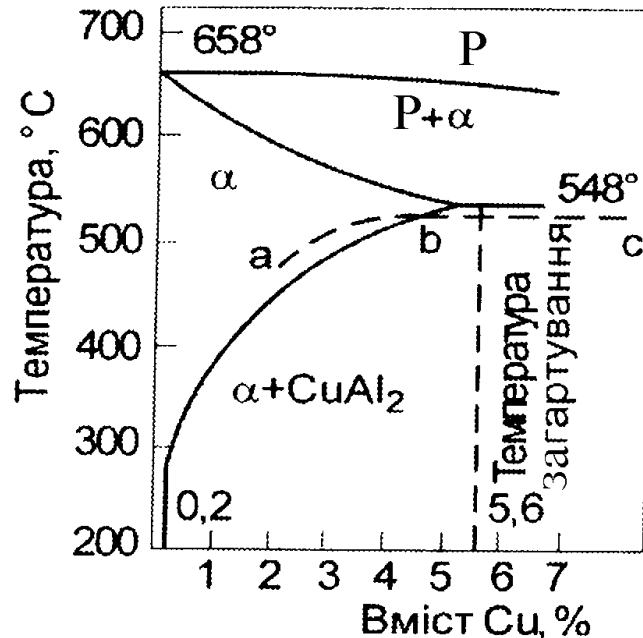


Рис. 12. Діаграма стану Al - Cu

Відзначимо деякі особливості діаграми:

1. Велика гранична розчинність у твердому стані ($C_P = 5,65\% \text{ Cu}$) і швидке зменшення її зі зниженням температури уможливають зміцнювальну термічну обробку сплавів (загартування й старіння). Зміцнювальною фазою є дисперсні вторинні виділення $CuAl_2$. Частина міді залишається у твердому розчині й додатково зміцнює сплав за типом розчину. Підвищена міцність і жароміцність – основні переваги сплавів системи Al – Cu.

2. Евтектична точка зсунута до інтерметаліду ($C_E = 33\%$), тому евтектика більш ніж наполовину складається з крихкої й твердої сполуки $CuAl_2$. З огляду на це сплави евтектичного складу (із найкращими ливарними властивостями) зовсім не придатні до використання через високу крихкість. Крім того, значний вміст міді призводить до помітного збільшення густини сплавів: від 2700 кг/м^3 для чистого алюмінію до 3300 кг/м^3 для сплаву з 10% Cu. З урахуванням зазначених обставин доводиться обмежувати концентрацію міді в ливарних сплавах від 1,0–1,5% (для забезпечення достатнього розчинного зміцнення) до 6,0 – 8,0% (щоб уникнути зайвої крихкості через утворення $CuAl_2$).

3. Невисока температура плавлення евтектики ($t_E = 548^\circ\text{C}$) та велике значення C_P зумовлюють широкий інтервал кристалізації в промислових

сплавах ($Al = 100 \text{ }^\circ\text{C}$). Такі сплави мають низьку рідкоплинність, схильні до пористості та утворення гарячих тріщин, у них сильно розвинена ліквация; нерівноважна евтектика з'являється вже за вмісту міді 1,5–2,5%. Тому за потреби одержати сплави $Al-Cu$ з необхідним комплексом механічних властивостей слід враховувати погіршення ливарних технологічних властивостей.

Сплав АЛ7 зміцнюється за розчинним типом, а також за рахунок дисперсних виділень фази $CuAl_2$. Крім того, домішки заліза й кремнію утворюють нерозчинні залізозмісні фази, що виділяються у вигляді обідків по границях дендритних осередків. Термічна обробка полягає в гартуванні від температури 515°C у гарячій воді й штучному старінні за температури 150°C протягом 2–4 год. У результаті сплав набуває таких властивостей: $\sigma_B = 200\text{--}250 \text{ МПа}$; $\sigma_T = 120\text{--}150 \text{ МПа}$; $\delta = 3\text{--}6\%$. У тих випадках, коли потрібно досягти підвищеної пластичності сплаву (за деякого зниження міцності), обмежуються тільки загартуванням. Сплав АЛ7 має підвищену усадку (1,4 %), у ньому часто утворюються гарячі тріщини, і з цієї причини його не рекомендують використовувати для лиття в кокіль. Сплав застосовують для лиття середньонавантажених деталей, невеликих за розміром і простої конфігурації, які працюють за температури $200\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сплав АЛ19 крім міді містить марганець і титан, що утворюють складні інтерметалідні фази: $T(Al_{12}Mn_2Cu)$ і $TiAl_3$ (домішки заліза жорстко обмежені). Ці фази разом із $CuAl_2$ формують твердий каркас по границях дендритних осередків (рис. 13) і надають сплаву підвищеної жароміцності. Термічну обробку проводять за більш високих температур (загартування від 545°C). Порівняно високий вміст міді в сплаві (до 5,5%) спричиняє утворення в литому стані нерівноважної потрійної евтектики. З огляду на це нагрівання для загартування проводять ступенево – із витримкою за температури $530 \text{ }^\circ\text{C}$ для розсмоктування нерівноважної евтектики. Це типовий прийом термічної обробки деяких ливарних сплавів, яким властива сильна дендритна ліквация. Сплав АЛ19 має гарні міцнісні властивості ($\sigma_B = 300\text{--}370 \text{ МПа}$, $\sigma_T = 170\text{--}250 \text{ МПа}$) за доброї для ливарних сплавів пластичності ($\delta = 5\text{--}8\%$). Усадка цього сплаву складає 1,25%, рідкоплинність і тріщиностійкість трохи вищі, ніж у сплаву АЛ7 (завдяки додаванню титану, що подрібнює структуру). Сплав застосовують для виготовлення високонавантажених силових деталей, які працюють за нормальних і підвищених температур (до $250\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$).

Сплав АЛ33 відрізняється від попередніх наявністю Ni , Zr і Ce , тому його структура більш складна. Нікелева фаза (Al_6CuNi) утворює твердий каркас, який збільшує міцнісні властивості сплаву за підвищених температур. Через це сплав АЛ33 менш міцний за нормальної температури ($\sigma_B = 280 \text{ МПа}$, $\sigma_T = 180 \text{ МПа}$, $\delta = 2\%$), але більш жароміцний за робочих температур $250\text{--}350^\circ\text{C}$, значно перевищуючи за цими показниками сплави $Al-Mg$ і $Al-Si$ (табл.8).

Сплав АЛ33 має задовільні ливарні властивості; його застосовують з тією ж метою, що й сплав АЛ 19.

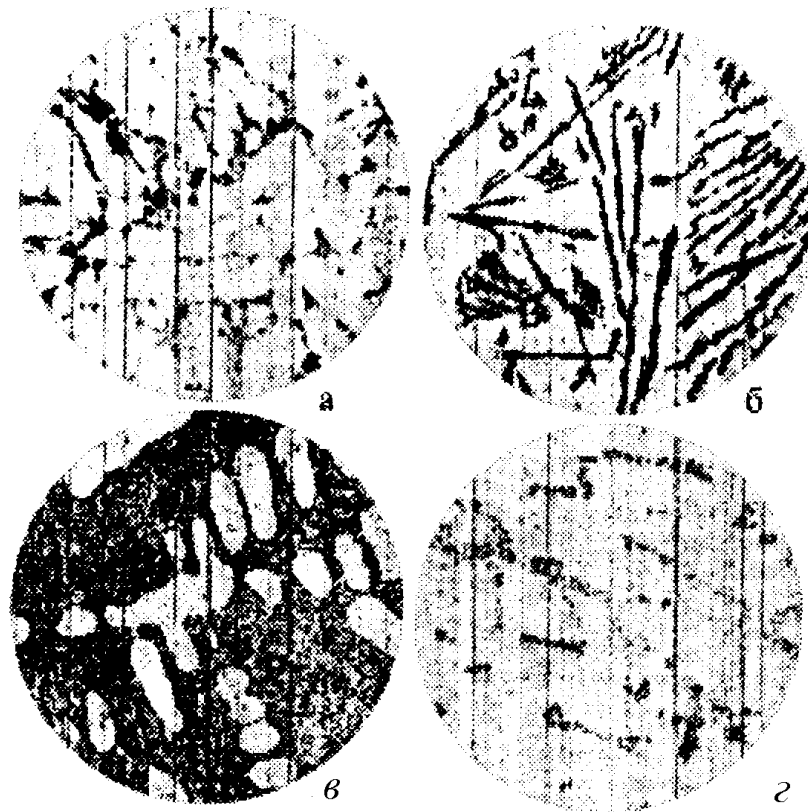


Рис.13. Структури ливарних алюмінієвих сплавів.

Таблиця 8. Значення тривалої (100 годин) міцності деяких алюмінієвих ливарних сплавів за температури 300 °С.

Сплав	АЛ8	АЛ2	АЛ4	АЛ5	АЛ7	АЛ 19	АЛ33
σ_{100} , МПа	15	25	30	35	30	65	90

Усі сплави *Al-Cu* мають низьку порівняно з іншими алюмінієвими сплавами корозійну стійкість і потребують ретельного захисту від корозії шляхом анодування або нанесення лакофарбових покриттів. Заварюють дефекти аргонодуговим або газовим зварюванням. Сплави добре обробляти різанням. Застосування їх в авіаційній і ракетно-космічній техніці обмежене.

10. Сплави системи Al – Si (силуміни)

Сплави систем *Al – Si* і *Al – Si – Me* – найбільш поширені ливарні алюмінієві сплави. Це пов'язано з комплексом гарних ливарних технологічних властивостей, обумовлених типом діаграми стану (рис.14).

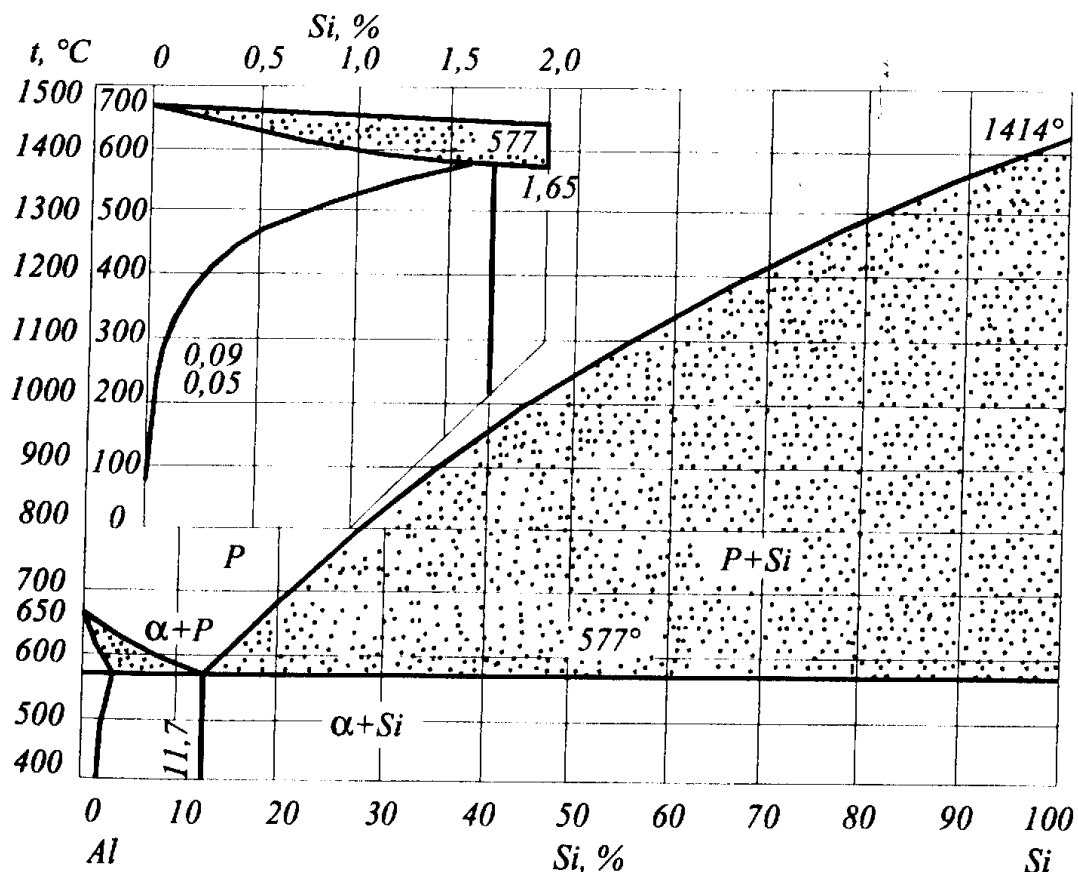


Рис. 14. Діаграма стану Al – Si

Евтектична точка (11,7 % Si) зсунута до чистого алюмінію, тому основу евтектики $\alpha + Si$ (каркасно-матричного типу) становить α -твердий розчин. Якщо кремній виділяється в евтектиці у вигляді великих утворень, то пластичність сплаву різко погіршується зі збільшенням частки евтектики в структурі. Модифікування натрієм (використовують також *Li*, *K*, *Sr*) зумовлює істотне подрібнення включень кремнію в евтектиці, у результаті чого підвищуються пластичні властивості ($\delta = 5-8\%$). Натрій вводять шляхом обробки розплаву солями $NaF+NaCl$. При цьому сплав засвоює близько 0,01% Na.

Невелика кількість крихкого кремнію в евтектиці й модифікування структури дозволяють одержувати евтектичні сплави з найкращими ливарними властивостями (сплав АЛ2). Доевтектичні сплави з 5 – 9% Si та іншими добавками також значно поширені (АЛ4, АЛ9, АЛ15); заевтектичні сплави (АК2) застосовують рідше.

У подвійних сплавах *Al – Si*, які одержали назву прості силуміни, внаслідок малого значення $C_p = 1,65\%$ і відсутності інтерметалідів ефект зміцнення від виділення вторинних фаз невеликий і не має практичного значення. Через це подвійні сплави належать до термічно не зміцнюваних і мають невисокі міцнісні властивості.

Для досягнення ефекту зміцнення під час термічної обробки (загартування й штучне старіння) у подвійні сплави вводять добавки магнію

та міді роздільно або спільно. Такі сплави називають спеціальними силумінами. Компоненти сплаву утворюють інтерметаліди зі змінною розчинністю у твердому стані, які ефективно зміцнюють сплав у ході термічної обробки. Міцнісні властивості таких сплавів підвищуються до $\sigma_B=250 - 330$ МПа, $\sigma_T=180 - 280$ МПа за пластичності $\delta = 3-6\%$.

Домішки заліза в сплавах *Al - Si* утворюють складну сполуку β -*FeSi* у вигляді крихких пластин, що різко знижують пластичність. Особливо небезпечні домішки заліза в спеціальних термічно зміцнюваних силумінах. Негативний вплив заліза істотно знижує додавання 0,2 – 0,5% Mn. У присутності марганцю замість β -*FeSi* утворюється фаза α -*Al-FeSiMn* у вигляді компактних рівновісних поліедрів, які меншою мірою впливають на пластичність. Механічні властивості силумінів помітно відмінні за різних способів лиття: найгірші властивості – у разі лиття в піщані форми; у випадку лиття в кокіль або під тиском σ_B та σ_T збільшуються на 20 – 30 МПа за одночасного зростання пластичності. Це можна пояснити тим, що більш висока швидкість кристалізації приводить до здрібнювання структурних складників. Крім того, твердий розчин містить велику концентрацію легуючих елементів. Це дає можливість здійснювати штучне старіння без попереднього загартування кокільного литва з деяких спеціальних силумінів (АЛ5). Розходження швидкостей кристалізації призводить також до того, що властивості зразків, вирізаних з товстостінних відливок, помітно гірші, ніж окремо відлитих зразків.

Сплав АЛ2 – єдиний промисловий подвійний сплав системи *Al - Si*. Для нього характерні невисокі механічні властивості, що залежно від умов лиття й розмірів перерізу вилівка, швидкості охолодження тощо коливаються в межах $\sigma_B = 120 - 220$ МПа за $\delta = 0,5 - 1,0\%$. Евтектичний сплав (10 – 13% Si) має відмінні ливарні властивості: найбільш високу рідкоплинність серед усіх алюмінієвих сплавів; незначну ймовірність утворення тріщин і пористості. Зі сплаву одержують щільні, герметичні вилівки з концентрованою усадочною раковиною. Лінійна усадка не перевищує 0,8%. Сплав використовують для всіх способів лиття в різні форми, застосовують у модифікованому стані, без термічної обробки.

Доевтектичні спеціальні силуміни (АЛ4, АЛ9, АЛ34, АЛ5) за технологічними властивостями трохи поступаються евтектичному сплаву АЛ2, але перевершують його за комплексом механічних властивостей. Зміцнення сплавів АЛ4, АЛ9 досягають шляхом уведення невеликої добавки магнію (0,2 – 0,4 %) за одночасного зниження вмісту кремнію до 6–10 % (щоб уникнути зайвої крихкості). Ці сплави, власне кажучи, належать до потрійної системи *Al - Si - Mg*, оскільки сполука *Mg₂Si*, яка утворюється в цьому випадку, відіграє вирішальну роль у забезпеченні міцності. Сплав АЛ4 піддають гартуванню від температури 535 °С у гарячій воді й штучному старінню за температури 175 °С протягом 15 год, під час якого відбувається виділення дисперсних частинок зміцнювальної фази *Mg₂Si*. Ця термічна обробка типова для всіх спеціальних силумінів. Знижений вміст кремнію

дозволяє використовувати сплави без модифікування в тих випадках, коли забезпечено підвищені швидкості кристалізації – лиття під тиском і в кокіль. У разі лиття за виплавними моделями та в піщані форми треба модифікувати сплави. Залежно від умов лиття й термічної обробки міцність коливається в межах $\sigma_B = 180 - 260$ МПа, $\sigma_T = 100 - 200$ МПа за відносного подовження $\delta = 3 - 6\%$.

У сплаві АЛ34 (ВАЛ5) збільшено вміст магнію до 0,55% і введено добавки 0,1 – 0,3% Ті та 0,15 – 0,40% Ве, що модифікують і зміцнюють сплав. У результаті сплав за міцністю перевищує інші спеціальні силуміни ($\sigma_B = 300 - 340$ МПа) і дозволяє одержувати щільні, високогерметичні виливки.

У сплав АЛ5 до магнію додають 1,0–1,5% міді, що змінює фазовий склад: утворюються нові зміцнювальні фази $\theta(CuAl_2)$ і $W(Al_xMg_5Cu_4Si_4)$. Вони забезпечують кращі механічні властивості за підвищених температур. Сплав АЛ5 і близький до нього за складом сплав АЛ3 – найбільш жароміцні серед спеціальних силумінів. Виготовлені з них деталі можуть тривалий час працювати за температури 270 °С. Механічні властивості за нормальної температури такі: $\sigma_B = 180 - 230$ МПа; $\delta = 0,5 - 1,0\%$. З огляду на знижений вміст кремнію (4,5 – 5,5%) сплави АЛ5 і АЛ3 застосовують без модифікування. Термічна обробка аналогічна термічній обробці сплаву АЛ4.

Для подвійних сплавів системи $Al - Si$ (АЛ2) характерна висока корозійна стійкість. Останню значно підвищують добавки магнію й особливо марганцю в кількості 0,2 – 0,5% (у сплаві АЛ4). Мідь, навпаки, різко знижує корозійну стійкість у сплавах АЛ5, АЛ3.

Спеціальні силуміни мають добрі ливарні властивості – високу рідкоплинність, гарну герметичність, відносно невелику лінійну усадку (0,8–1,0%). Усі вони належать до вузькоінтервальних сплавів: інтервал кристалізації $\Delta t_{кр} = 30 - 50$ °С. Сплави АЛ4 і АЛ2 мають підвищену здатність до поглинання газів і утворення газової пористості, сплаву АЛ9 це властиво меншою мірою. Для підвищення герметичності великогабаритних виливків заливання й кристалізацію здійснюють в автоклавах за надлишкового тиску.

Сплави АЛ4 і АЛ9 застосовують для одержання найбільш важливих, складних і великогабаритних деталей, що несуть великі навантаження, наприклад: картерів двигунів внутрішнього згоряння; клапанів пневмогідролічної системи літальних апаратів; корпусів насосів. Сплав АЛ34 призначено для лиття складних за конфігурацією корпусних деталей, які працюють під високим внутрішнім тиском; робочі температури сплаву не вищі ніж 150 – 200°С. Сплав АЛ5 застосовують для лиття великогабаритних деталей високої навантаженості, які працюють в умовах підвищених температур (головки циліндрів двигунів повітряного охолодження й ін.). Сплави АЛ2, АЛ4, АЛ9, крім того, використовують для лиття мало- і середньонавантажених деталей приладів, агрегатів і двигунів, а також побутових виробів.

Евтектичні спеціальні силуміни (АЛ25, АЛ30), мають гарні ливарні властивості, відрізняються вищою жароміцністю, тому що містять добавку нікелю (1 – 2%), яка утворює складні фази у вигляді твердого каркаса; добавка титану підвищує технологічні властивості сплавів.

Заевтектичний силумін АК21М2 містить 20 – 22% Si. Структура сплаву складається з первинних кристалів кремнію й евтектики. Сплав має високу рідкоплинність, твердість і зносостійкість. Добавки нікелю й хрому забезпечують високу жароміцність за температури до 300 – 320 °С. Сплави АЛ25 і АК21М2 нині використовують замість сплаву АЛ10В, для якого характерна об'ємна усадка, для виробництва поршнів та інших важливих деталей, що працюють за підвищених температур.

Цинковий силумін АЛ11 містить добавку цинку (7 – 12%), що добре розчиняється у твердому алюмінії й забезпечує зміцнення за розчинним типом. Це дозволяє використовувати сплав АЛ11 у литому стані без термічної обробки. Механічні властивості сплаву АЛ11 вищі, ніж механічні властивості сплаву АЛ2 ($\sigma_B = 200 - 250$ МПа, $\delta = 1,5 - 2\%$).

Рівень властивостей силумінів типу АК9ч великою мірою визначають такі чинники, як середня відстань між гілками дендритів евтектичного кремнію і їх морфологія, а також ступінь розгалуженості первинних дендритів α -Al. Зазначені структурні параметри забезпечують модифікуванням різними елементами.

Уведення елементів-модифікаторів (*Na, Sr, Y, La, Sb, Zr, Ti*) у силуміни забезпечує збереження форм росту первинних кристалів α -Al твердого розчину у вигляді округлих дендритів із тим або іншим ступенем розгалуженості й різним перерізом гілок (рис. 15). Евтектичний кремній у модифікованих сплавах росте у вигляді сильно розгалужених плоскогранних (у разі введення сурми, ітрию, цирконію, титану – (рис. 15, *в, д, е, є*), округлих (у присутності натрію – рис. 15, *а*) або кістякових (у випадку введення стронцію й лантану – рис. 15, *б, з*) кристалів. Високий ступінь кооперативності евтектики й переважання округлих границь розподілу в кремнієвому каркасі забезпечує сприятливий комплекс механічних властивостей.

Найбільшого поширення в ракетно-космічній техніці набуло застосування ливарного сплаву АЛ4С, додатково легованого сурмою. Із нього виготовляють такі важливі деталі, як корпуси клапанів складної форми, дренажні патрубки, корпуси насосів.

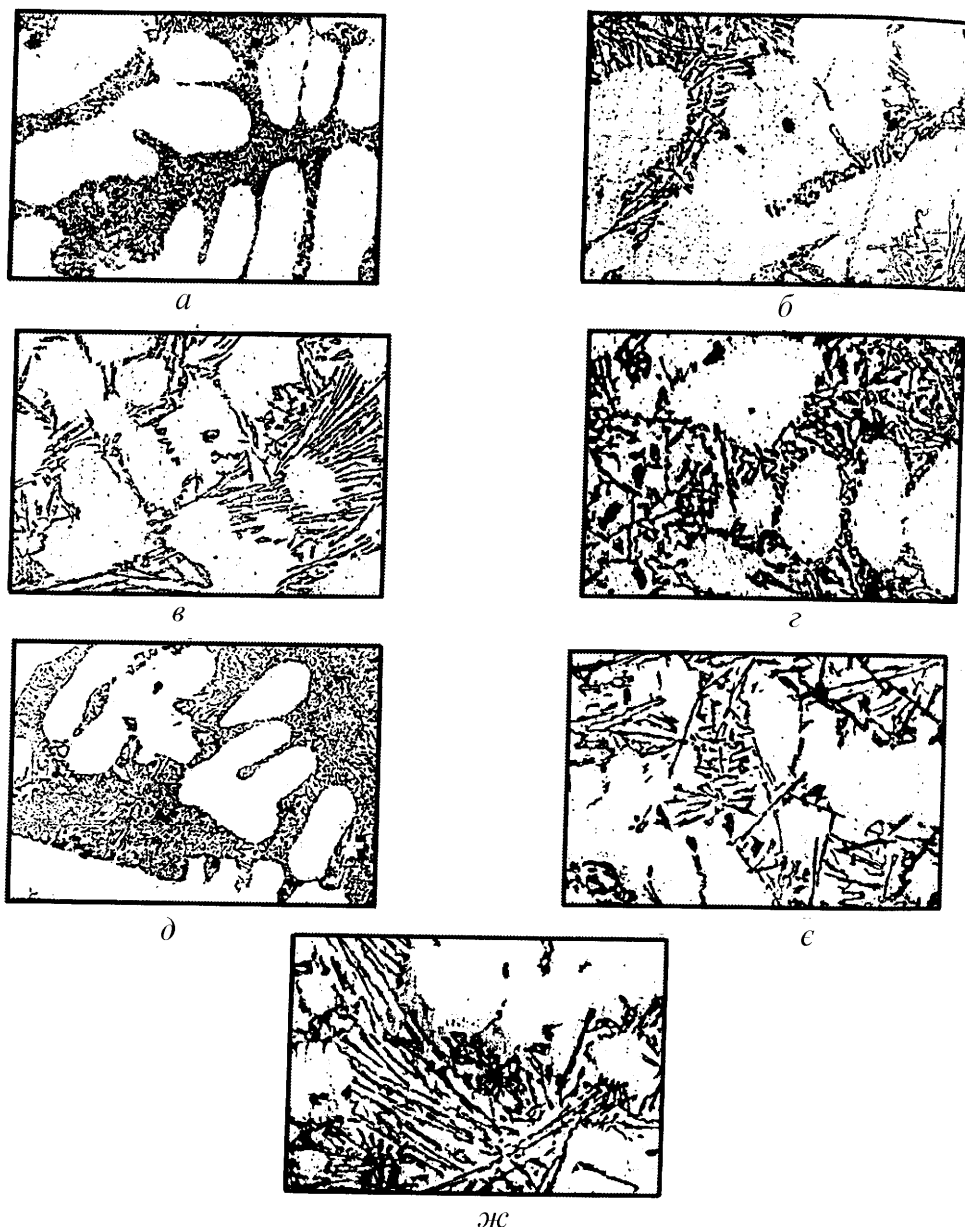


Рис.15. Мікроструктура сплаву АК9ч, модифікованого різними елементами, $\times 200$

a – N; *б* – Sr, *в* – Y, *г* – La; *д* – Sb; *е* – Zr; *є* – Ti

11. Поршневі ливарні силуміни

Аналіз умов роботи поршнів сучасних важконавантажених дизелів та інших поршневих двигунів дозволяє сформулювати вимоги до матеріалу поршнів. Так, під час вибору сплаву необхідно враховувати:

- вплив режимів термічної обробки й структури сплаву на його властивості, що визначають надійність і довготривалість роботи поршнів;
- режим роботи поршнів, зокрема, потужність двигуна, механічні й технологічні властивості сплаву, його вартість і дефіцитність;
- роботу двигунів із поршнями з вибраного сплаву й оцінку ефективності заміни матеріалу за результатами попередніх досліджень.

Характеристики основних поршневих сплавів подано в табл. 9 – 13.

Таблиця 9. Хімічний склад поршневих силумінів

Марка сплаву	Вміст основних компонентів, % мас.							Домішки, %, не більше	
	Si	Cu	Mg	Ni	Mn	Ti	Інші елементи	Fe	Zn
АЛ1	<0,7	3,75–4,5	1,25–1,75	1,75–2,25	–	–	–	0,8	0,3
АЛ10	4,5–6,5	6,0–8,0	0,2–0,5	0,5	0,5	–	–	2,5	0,6
АЛ25	1,0–13,0	1,5–3,0	0,8–1,3	0,8–1,3	0,3–0,6	0,05–0,2	0,2	0,8	0,5
АЛ26	20,0–22,0	1,5–2,5	0,4–0,7	1,0–2,0	0,4–0,8	0,2	0,1–0,4	0,7	0,3
АЛ30	11,0–13,0	0,8–1,5	0,8–1,1	0,8–1,3	0,2	0,2	–	0,7	0,2
АК21	20,0–22,0	1,4–1,8	0,4–0,6	1,4–1,7	0,64–0,8	–	0,4–1,7	0,7	0,21
ВАЛ6	11,0–13,0	3,2–4,0	0,8–1,3	2,0–3,0	0,4–0,7	0,1–0,3	0,05–0,15	0,5	0,2

Таблиця 10. Механічні властивості поршневих сплавів за кімнатної та підвищених температур

Марка сплаву	$\sigma^{20^\circ\text{C}}$, МПа	$\delta^{20^\circ\text{C}}$, %	НВ до стабілізації за 250 °С	НВ після стабілізації протягом 100 год			σ_{100}^{300} , МПа
				250 °С	300 °С	350 °С	
АЛ1	225–174	0,1–0,3	95–125	–	–	–	54,0
АЛ10В	196–235	0,2–0,3	100–120	27–32	17–20	10–12	46,5
АЛ25	196–235	0,2–0,6	100–110	17–33	17–23	11–15	49,0
АЛ26	157–196	0,1–0,4	95–105	30–34	20–23	13–16	51,4
АЛ30	196–235	0,3–0,6	85–90	22–27	14–26	8–10	44,1
АК21	137–157	–	90	–	–	–	–
ВАЛ6	196–235	–	100	–	–	–	49,0

Таблиця 11. Фізичні властивості поршневих силумінів

Марка сплаву	ρ , кг/м ³	$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹			
		20 – 100 °C	20 – 200 °C	20 – 300 °C	20 – 400 °C
АЛ1	2750	22,3	23,2	24,4	–
АЛ10В	2850	22,0	23,0	24,0	25,0
АЛ25	2700	19,0	20,0	21,0	22,0
АЛ26	2720	19,0	20,0	21,0	22,0
АЛ30	2680	17,0	18,0	19,0	20,0
АК21	2680	17,0	18,0	19,0	20,0
ВАЛ6	2800	18,8	19,5	19,9	19,8

Таблиця 12. Ливарні властивості поршневих сплавів

Марка сплаву	Температура заливання, °C	Рідкоплинність (пруткова проба), мм	Гарячеламкість (ширина кільця), мм	Лінійна усадка, %
АЛ1	720	250	27,5	1,3
АЛ 10В	710	270	10,0	1,25
АЛ25	700	420	5,0	1,15
АЛ26	700	425	5,0	1,15
АЛ30	810	390	7,5	1,05
АК21	810	390	7,5	1,05
ВАЛ6	700	400	7,5	1,12

Таблиця 13. Типові механічні властивості сплаву АЛ1 у випадку лиття в піщані форми

Вид термообробки	T, °C	σ_B , МПа	δ , %	σ_{100} , МПа	$\sigma_{0,2/100}$, МПа
Т5	20	254,8	1,0	–	–
	200	176,4	1,5	–	98,0
	250	171,5	1,9	–	60,7
	270	161,7	2,2	–	–
	300	127,4	4,2	54,0	36,3
Т5 і стабілізація протягом 100 год	200	147,0	2,5	–	49,0
	250	137,2	3,0	–	32,3
	300	98,0	6,0	49,0	26,5

Сплав АЛ1 належить до системи $Al - Cu - Ni - Mg$, у якій магній із нікелем потрійних сполук не утворюють. У цій системі існують лише сполуки Al_3Mg і Al_3Ni . Структура сплавів системи $Al-Cu-Ni$ містить фази $S(Al_2CuMg)$ і $T(Al_6Cu_3Ni)$. У процесі загартування сплаву фаза S повністю

переходить в α -твердий розчин, а фаза T не розчиняється. Цей сплав у литому стані має фазовий склад – α -Al, $S(Al_2CuMg)$, $T(Al_6Cu_3Ni)$; а в загартованому стані – α -Al, $T(Al_6Cu_3Ni)$.

Фаза S в процесі нагрівання під загартування цілком переходить в α -твердий розчин, а під час його розпаду виділяється у вигляді дисперсних частинок, розташованих по всьому об'єму α -твердого розчину. У цьому стані АЛ1 має максимальну жароміцність (табл. 13). У разі зміни співвідношення між вмістом міді й нікелю змінюється фазовий склад сплаву АЛ1 і його механічні властивості, особливо жароміцність. Оптимальні властивості сплав АЛ1 має за більш високого вмісту міді (5%). Це зумовлено тим, що для утворення фази $S(Al_2CuMg)$ за вмісту в сплаві 1,5% магнію необхідно 4,1% міді; крім того, певна кількість міді йде на утворення фази $T(Al_6Cu_3Ni)$.

За досить високих міцнісних характеристик сплави системи $Al-Cu-Ni$ мають 2 істотні недоліки: високий коефіцієнт лінійного розширення та низькі ливарні властивості (вони схильні до утворення гарячих тріщин, “рихлот” і газової пористості). Установлено, що введення кремнію хоч і поліпшує ливарні властивості сплаву АЛ1, але водночас спричиняє різке зниження його жароміцності (за вмісту 1,5% Si жароміцність сплаву АЛ1 знижується на 50%). Саме незадовільні ливарні властивості сплавів цього типу стали причиною того, що нині їх практично не використовують як матеріал для виготовлення литих поршнів, а використовують для вироблення поршнів методами обробки тиском.

Сплав АЛ10В належить до системи $Al - Cu - Si$. Його виготовляють в основному з вторинної сировини. Механічні й технологічні характеристики сплавів системи $Al-Cu - Si$ змінюються в досить широких межах залежно від вмісту в сплаві основних компонентів і домішок. Дослідження, проведені з метою виявлення оптимального складу сплаву АЛ10В, показали, що найбільш високі механічні властивості має сплав, який містить: 6,6 – 7,0 % Cu; 4,5 – 5,5 % Si; 0,2 – 0,35 % Mg; 0,3 – 0,45% Mn; не більше ніж 0,8 % Fe.

У нерівноважних умовах кристалізації сплав АЛ10В оптимального хімічного складу має складний фазовий склад: α -Al, Si, $CuAl_2$, Al_7Cu_2Fe , $W(Al_xMg_5Si_4Cu_4)$; це забезпечує більш високу жароміцність, ніж у сплаві АЛ5. Однак сплав АЛ10В поступається жароміцністю сплаву АЛ1. Окремо відлиті в піщані форми зразки сплаву АЛ10В мають межу тривалої міцності протягом 100 год за температури 300 °С 44 – 51,5 МПа, тоді як аналогічні зразки в термічно обробленому стані (відповідно до режиму Т6 – загартування від температури 515 °С й штучне старіння за температури 180 °С протягом 5 годин) – тільки 39 МПа. Така жароміцність не задовольняє вимоги до матеріалу для поршнів сучасних двигунів. Тому матеріал для виготовлення поршнів сучасних двигунів варто використовувати в литому стані без загартування.

Основна причина руйнування поршнів зі сплаву АЛ10В – великі зміни розмірів унаслідок фазових перетворень. У міру підвищення робочої температури й тривалості роботи двигунів відбувається збідніння твердого

розчину алюмінію. Основний продукт розпаду твердого розчину – частинки фази $CuAl_2$, виділення яких із твердого розчину призводить до збільшення об'єму поршнів і у зв'язку з цим – до утворення задирок, а потім і тріщин, особливо в місцях різких переходів до тонких перерізів стінок. Збільшення діаметра поршнів іноді сягає 0,02 – 0,04 мм. Дослідження показують, що «розбухання» поршнів у 2 – 4 рази більше в термічно оброблених за режимом Т6 сплавах, ніж у литих. Із цього випливає, що загартовувати поршні з ливарних сплавів недоцільно.

Чим вища температура відпуску і більша тривалість витримки, тим більшою мірою стабілізуються структура сплаву й розміри поршнів, тим менші значення залишкових напружень. Оптимальний режим відпуску для литих поршнів зі сплаву АЛ10В – нагрівання до 200 – 220 °С із витримкою за цієї температури 12–15 год. У цьому випадку залишкові напруження зменшуються до 75% порівняно з вихідним станом. Відпуск за кімнатної температури малоефективний, а за більш високої температури відбувається значне знеміцнення поршнів і різке зниження їх твердості, що неприпустимо.

Для виготовлення поршнів потужних двигунів замість сплаву АЛ10В рекомендують використовувати більш жароміцні спеціальні силуміни. Слід відзначити, що евтектичні леговані силуміни (АЛ25, АЛ30) мають порівняно високі технологічні характеристики. Із погляду оброблюваності різанням вони лише незначно поступаються алюмінієво-мідним сплавам.

Сплав АЛ25 має вищу жароміцність за температури 300 °С порівняно з жароміцністю сплавів АЛ30 і АЛ10В, гарні фізико-механічні й технологічні властивості, аналогічні властивостям сплаву АЛ30. Крім того, у процесі виробництва сплаву можна використовувати 30 – 50% вторинних сплавів у чушках, що має велике значення для зниження витрат на випуск продукції та розширення сировинної бази для її виготовлення.

Оскільки коефіцієнт лінійного розширення і густина подвійних сплавів системи $Al-Si$ зменшуються зі збільшенням концентрації кремнію в сплаві, сьогодні для вироблення важконавантажених форсованих дизелів використовують силуміни з високим вмістом кремнію. За збільшення концентрації кремнію підвищується зносостійкість сплаву і його корозійна стійкість. Вміст кремнію відрізняє евтектичні силуміни від заевтектичних. Для підвищення жароміцності до складу заевтектичних легованих силумінів вводять титан, кобальт або хром, а іноді підвищують вміст міді до 3,5 – 4,5% і нікелю до 2,5 – 3,5%.

У результаті досліджень було встановлено, що комплексне легування сплавів типу силуміну (АЛ26) міддю, нікелем і марганцем (або кобальтом) значно підвищує їх жароміцність. Зокрема, жароміцність сплаву АЛ26 вища, ніж сплаву АЛ25. Її забезпечує підвищення ступеня легування твердого розчину елементами з низьким коефіцієнтом дифузії, а також зміцнення границь зерен твердого розчину частинками інших фаз (Al_6Cu_3Ni , $Al_xMg_5Si_4Cu_4$), що до температури 300 °С мало взаємодіють з α -твердим розчином. Крім того, дрібних частинок кремнію, здатних до коагуляції, у сплаві АЛ26 менше. Для сплавів АЛ25 і АЛ26 характерний менший вміст

міді, ніж для сплаву АЛ10В, тому вони мають менший коефіцієнт лінійного розширення, кращі ливарні властивості й вищу жароміцність, а також менші зміни об'єму під час роботи поршнів. Отже, можна зробити менший зазор між поршнем із нових сплавів і циліндром – цей фактор відіграє важливу роль у зниженні витрат мастила й пального.

Для виготовлення поршнів двигунів із форсованим режимом і підвищеним ресурсом роботи можна використовувати новий ливарний алюмінієвий сплав ВАЛ6. Цей сплав має гарні ливарні властивості у випадку лиття в кокіль, задовільну оброблюваність різанням, більш низький порівняно з деформовними сплавами АК4 і АК4-1 коефіцієнт лінійного розширення. Високу жароміцність сплаву ВАЛ6 обумовлює підвищення ступеня легованості твердого розчину алюмінію елементами з низьким коефіцієнтом дифузії, а також зміцнення границь зерен твердого розчину складними частинками інших фаз, стійких за високих температур. Опір втомі за температури до 250 °С (межа витривалості) сплаву АК4-1 вищий, ніж сплаву ВАЛ6, однак в інтервалі робочих температур 300 – 350°С сплав ВАЛ6 не поступається за значенням межі втоми сплаву АК4-1.

Слід зауважити, що сплави на основі системи *Al-Si*, використовувані для роботи за підвищеної температури, недоцільно гартувати, оскільки при цьому відбувається коагуляція та сфероїдизація частинок інших фаз, особливо кремнію, а також порушення цілісності каркаса литої структури, що підвищує повзучість за високої температури, а отже, знижує жароміцність. Тому сплав ВАЛ6 піддають старінню з литого стану з метою стабілізації структури й усунення ливарних напружень.

Литі поршні переважно застосовують тоді, коли напруження на поршні вирівняно й можна використовувати велику поверхню. Це має місце в більшості карбюраторних і дизельних двигунів, навантажених до звичайного рівня.

Поршневі алюмінієві сплави розглянуто в даному посібнику тому, що нині в авіаційній техніці ще застосовують поршневі двигуни (наприклад, на літаку АН-2 різних модифікацій). Використання авіадизелів, що мало місце в 40-ві рр. ХХ ст., не набуло подальшого розвитку, тому що ці двигуни не могли забезпечити досягнення дозвукових та надзвукових швидкостей польоту.

12. Пічне обладнання для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів

Загальні тенденції розвитку пічного обладнання термічних та інших гарячих цехів машинобудівних підприємств полягають у такому:

1. Модульне виконання камери печі й обслуговуючих вузлів.
2. Рекуперація й регенерація відпрацьованого тепла для підвищення теплового коефіцієнта корисної дії печей.
3. Використання найновіших матеріалів.
4. Застосування комбінованих методів нагрівання.

5. Використання мікропроцесорів для керування процесами термічної обробки.

6. Математичне моделювання режимів нагрівання й охолодження виробів.

7. Використання висококонцентрованих джерел енергії.

8. Використання захисних атмосфер і вакууму.

Важлива особливість печей, побудованих за модульним принципом, – можливість швидкого переналагодження на обробку деталей із різних матеріалів, що забезпечує гнучкість виробництва. Це, наприклад, змінні кришки шахтних печей, одну з яких оснащено вентилятором. У першому випадку температура в робочому просторі печі досягає 700 °С, чого цілком достатньо для обробки алюмінієвих сплавів, у другому випадку – 1400 °С – для сталей. Заміну кришок можна здійснити за кілька десятків хвилин. Швидке переналагодження печей дозволяє зменшити їх кількість на підприємстві, особливо в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва з широкою номенклатурою виготовлюваної продукції.

Найбільш актуальна проблема рекуперації та регенерації відпрацьованого тепла у випадку проектування та модернізації полуменевих печей, які застосовують для виплавки вторинного алюмінію. Полуменеві печі практично не використовують для термічної обробки заготовок і деталей з алюмінієвих сплавів через їх низьку температуру плавлення.

Застосування комбінованих методів для нагрівання деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів має деякі особливості. У першу чергу це застосування аеродинамічного нагрівання, за якого спочатку використовують звичайне електричне нагрівання, а потім вимикають нагрівники і вмикають вентилятори.

Застосування математичного моделювання й мікропроцесорних систем керування процесами дозволяє здійснювати термічну обробку деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів зі значним температурним градієнтом, величина якого може досягати 160 – 200 °С.

Із висококонцентрованих джерел енергії, використовуваних для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів, найбільш поширені лазери. Лазерна обробка забезпечує високу продуктивність, високі швидкості нагрівання й охолодження оброблюваних ділянок деталей, уможливорює локальну обробку обмежених поверхонь, не потребує гартівних середовищ. Електронно-променеві пушки використовують у ході нанесення алюмінієвих покриттів на деталі з різних матеріалів. У процесі термічної обробки деталей з алюмінієвих сплавів це джерело тепла застосовують обмежено через високу концентрацію енергії. Прикладом може бути електронно-променева обробка поршнів. Після неї термін служби поршнів збільшується в 1,7 – 2,0 рази.

Захисні атмосфери для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів використовують обмежено. Це пов'язано насамперед із наявністю на поверхні алюмінію і його сплавів досить міцної й щільної оксидної плівки, яка перешкоджає подальшому окисненню металу навіть за

підвищеної температури. Таким чином, деталі і заготовки з алюмінієвих сплавів нагрівають переважно в повітряній окисній атмосфері. Під час виготовлення особливо важливих деталей, а також у процесі лазерної термічної обробки застосовують такі захисні атмосфери, як аргон і гелій. Деталі з алюмінію і його сплавів для авіаційної та ракетно-космічної техніки, особливо тонкостінні, піддають термічній обробці у вакуумі.

Конструктивні особливості обладнання для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів

Устаткування для термічної обробки деталей з алюмінієвих сплавів має деякі відмінності від призначеного для обробки деталей з інших конструкційних матеріалів. Конструктивні відмінності визначаються в основному максимальною температурою, необхідною для зміцнювальної термічної обробки деформованих і ливарних сплавів, та способами досягнення даної температури в робочому просторі печі.

Оскільки максимальна температура нагрівання алюмінієвих сплавів під загартування складає 540 °С для силумінів і 490 – 528 °С для деформованих сплавів, немає потреби встановлювати допустиму температуру в робочому просторі печі, набагато вищу цих значень. Як правило, температура робочого простору печі в процесі нагрівання деталей або заготовок з алюмінієвих сплавів не перевищує 700 °С, що цілком достатньо для високопродуктивної роботи. У випадку застосування різноманітних видів відпалу, наприклад, у ході багатоступеневої обробки тиском заготовок із листових алюмінієвих сплавів, а також під час старіння, температура, як правило, не перевищує 200 °С. Операції сушіння, у тому числі вакуумного, проходять за температури, нижчої 100 °С, тому що за більш високих температур може відбуватися жолоблення тонкостінних деталей.

Особливо гостро перед вітчизняними підприємствами стоїть проблема раціонального використання енергії в процесі здійснення операцій термічної обробки. Найбільшого поширення, особливо в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, набули печі опору. З огляду на коефіцієнт корисної дії вони досить неефективні, тому що енергія спочатку витрачається на нагрівання нагрівальних елементів, потім – кладки печі і її робочого простору і тільки потім – оброблюваних заготовок або деталей. Ці печі ефективні за безперервного використання або хоч би за двозмінного режиму роботи, що дозволяє мінімізувати витрати енергії на прогрів печі. Водночас для термічної обробки заготовок і деталей зі сталі, чавуну, тугоплавких металів і сплавів, алюмінієвих сплавів печі опору найбільш універсальні. Підвищити тепловий коефіцієнт корисної дії таких печей дозволяє використання волокнистих теплоізоляційних матеріалів, які мають невисоку теплоємність за низької теплопровідності.

Інші способи нагрівання мають істотні обмеження за формою й розмірами оброблюваних деталей, а також за умовами обробки. Наприклад,

контактним способом доцільно нагрівати лише довгі деталі з порівняно невеликим поперечним перерізом (діаметром до 85 мм). Застосовувати даний спосіб для нагрівання деталей з алюмінієвих сплавів у процесі термічної обробки недоцільно через малий питомий опір алюмінію. Форма та розміри оброблюваної заготовки у випадку індукційного нагрівання також обмежені конструктивним виконанням індуктора.

Важливий фактор мінімізації витрат енергії на операції термічної обробки заготовок і деталей незалежно від їх матеріалу – герметизація робочого простору печі. Це дуже важливо для використання аеродинамічних печей, де мають місце повітряні потоки зі швидкістю до 25 м/с, а також у випадку застосування будь-яких атмосфер заданого складу (екзо- й ендотермічних, відновних, захисних, вакууму). Герметичності робочого простору печі досягають реалізацією контакту заслінок, кришок, дверцят печі з корпусом у парі «теплоізоляційний матеріал – теплоізоляційний матеріал». У разі контакту «метал–метал» герметизація робочого простору є практично неможлива, тому що для ущільнення такого з'єднання потрібні значні контактні тиски, яких рідко можна досягти в нерухомих з'єднаннях і не можна забезпечити в рухомих. Контакт «теплоізоляційний матеріал–метал» швидко втрачає щільність через руйнування або деформацію теплоізоляційного матеріалу під час відкривання й закривання заслінки, дверцят, кришки. У випадку заміни теплоізоляційного матеріалу в ході модернізації термічної печі доцільно також передбачити й змінення конструкції дверцят (заслінки, кришки) і корпусу для того, щоб уможливити розміщення на них ущільнювальних елементів з теплоізоляційних матеріалів.

Для нагрівання деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів в окисній або захисній атмосфері найбільш ефективні аеродинамічні печі, або печі аеродинамічного нагрівання. Для термічної обробки локальних ділянок поверхонь деталей ефективно застосування лазерних технологічних комплексів.

Аеродинамічні печі

Ефективний спосіб зменшення витрат електроенергії на нагрівання заготовок і деталей з алюмінієвих сплавів – застосування аеродинамічних печей. Особливість цих печей полягає в тому, що нагрівання заготовок або деталей здійснюється не стільки за рахунок тепла, яке виділяють нагрівальні елементи, скільки за рахунок примусової циркуляції атмосфери в робочому просторі під впливом обертання вентиляторів. Таким чином, електронагрівники, що споживають максимальну кількість енергії, вмикаються лише на короткий час, необхідний для нагрівання повітря в робочому просторі печі, а далі вмикається вентилятор. Тому витрати електроенергії на нагрівання заготовок в аеродинамічних печах у 4 рази менші, ніж у звичайних печах опору. Спочатку такі печі використовували в ракетно-космічній промисловості для ствердіння виробів зі склопластиків і вуглець-вуглецевих матеріалів. Мінімальна витрата електроенергії

уможливорює впровадження цих печей в інші галузі машинобудування, де використовують алюмінієві сплави. Серійно випускають аеродинамічні печі, що забезпечують встановлення й підтримання в робочому просторі температури до 700 °С. Підвищення температури в робочому просторі печі вище 700 °С призводить або до подорожчання вентиляторів через необхідність їх виготовлення із дорогих жароміцних та жаростійких матеріалів, або до їх швидкого зносу. У робочому просторі печі розташовано, як правило, тільки лопаті вентилятора, які обертаються на валу. Електромеханічний привід вентилятора доцільно розміщувати поза робочим простором печі. Для аеродинамічних печей характерна наявність екрана, який унеможливорює нагрівання оброблюваних деталей унаслідок випромінювання від нагрівників й створює спрямовані трибічні і навіть чотирибічні потоки атмосфери печі. Це дозволяє з високою точністю регулювати температуру в робочому просторі печі.

Принцип дії аеродинамічних печей ґрунтується на таких залежностях:

$$\mu = \frac{n m \bar{u} \lambda}{3},$$

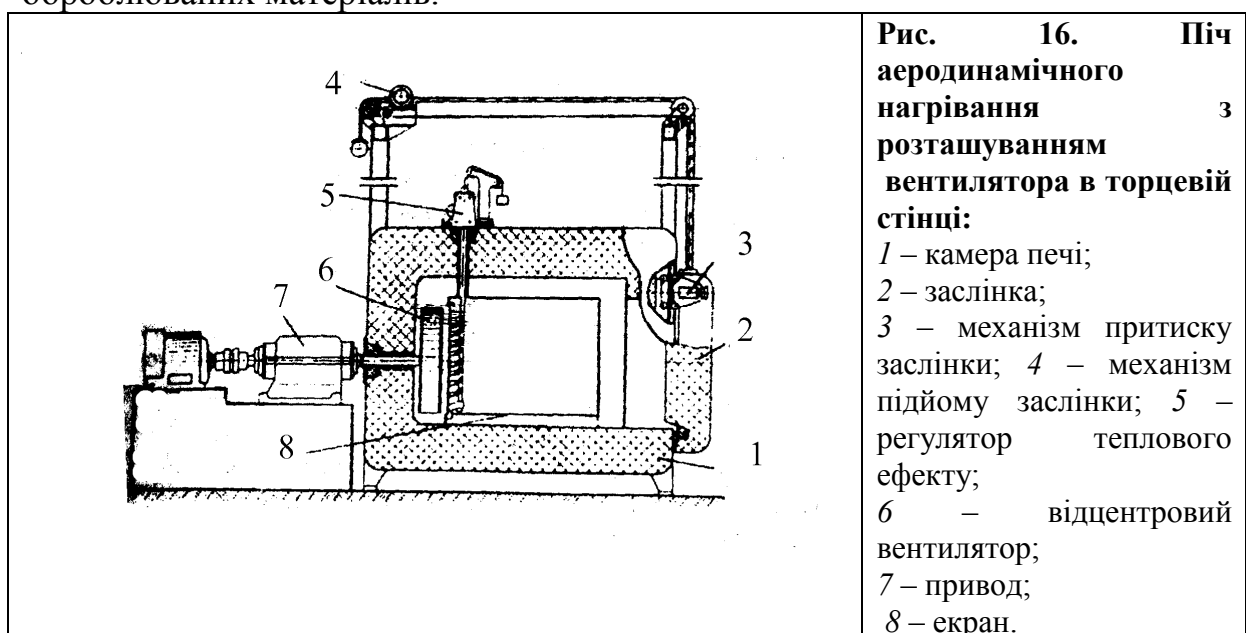
де μ – коефіцієнт внутрішнього тертя, Н·с/м²; n – кількість молекул в одиниці об'єму, 1/м³ (число Лошмідта); m – маса молекули газу, кг; λ – довжина вільного пробігу молекул, м; \bar{u} – середня швидкість руху молекул, м/с;

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

$$T = \frac{\bar{u}^2 m}{3k},$$

де T – абсолютна температура газу, К; k – стала Больцмана, кДж/К.

Традиційно застосовувані печі аеродинамічного нагрівання мають вентилятор, розташований або на торцевій стінці камери (рис.16), або на подині. Такі печі мають істотні обмеження щодо видів обробки й оброблюваних матеріалів.



Гнучкість термічного виробництва забезпечують, наприклад, оснащенням шахтних печей змінними кришками (рис.17). Такі печі називають комбінованими. Для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів використовують кришки з закріпленим на них вентилятором. Під час термічної обробки сталевих або чавунних деталей використовують кришки без вентиляторів. Така конструкція печі дозволяє швидко змінювати номенклатуру виготовлюваної продукції за мінімальних витрат на придбання встаткування й мінімальної площі виробничих приміщень.

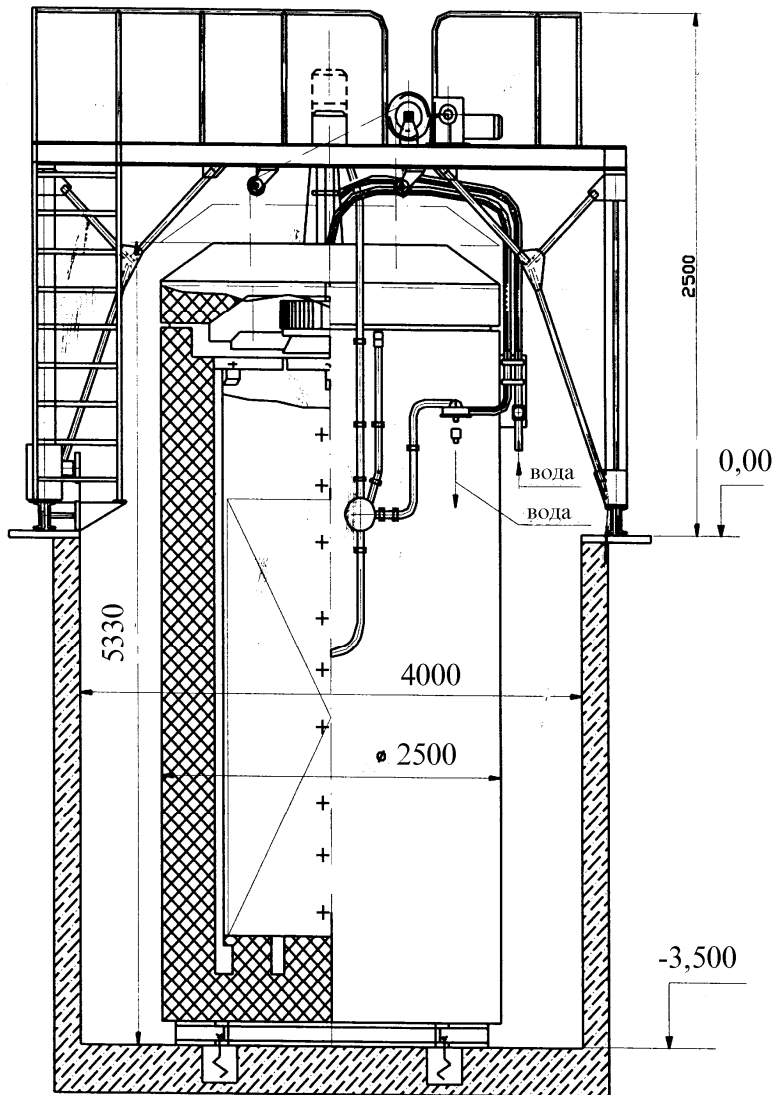


Рис. 17. Піч зі змінною кришкою як варіант печі аеродинамічного нагрівання (на прикладі комбінованої шахтної електропечі опору СШО-1530/11-ИК виробництва Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут").

До недоліків печей аеродинамічного нагрівання можна віднести значний рівень шуму під час випускання нагрітого газу з робочого простору печі для регулювання температури в ньому. Обмеження за максимальною температурою нагрівання (до 700°C) стосовно термообробки деталей з алюмінієвих сплавів не істотне.

Лазерні технологічні комплекси

Лазерні технологічні комплекси (рис.18) набули значного поширення в різних галузях машинобудування. У вітчизняній промисловості ще з 80-х рр. минулого сторіччя застосовували комплекси М-36М та М-25С. Комплекс М-36М призначено в основному для розкрою листових матеріалів. Комплекс М-25С дозволяє поряд із розкромом листових матеріалів здійснювати операції термічної обробки, наплавлення, зварювання.

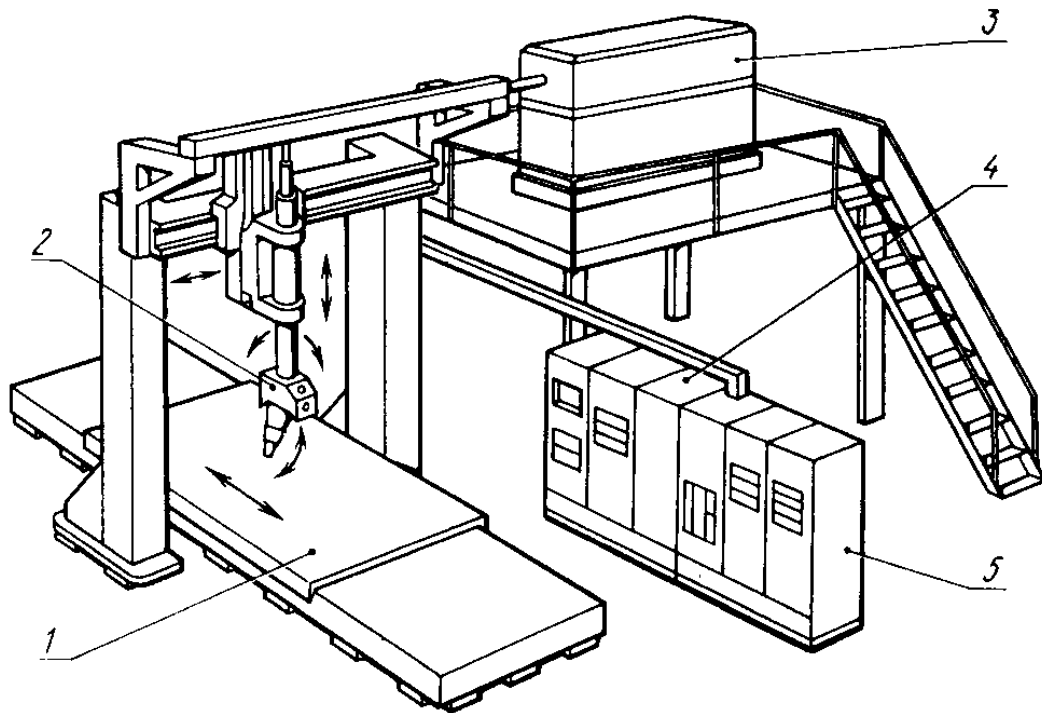
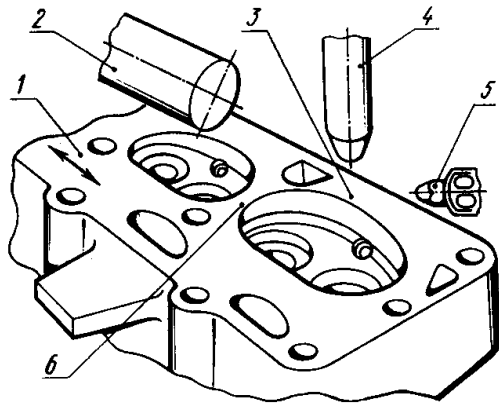


Рис. 18. Пристрій лазерного технологічного комплексу М-25С:
1 – позиційний стіл; 2 – оптико-механічний блок; 3 – лазер на CO_2 ;
4 – блок контролю і керування; 5 – силовий блок

Для обробки головок циліндрів автомобільних двигунів на Московському автомобільному заводі ім. Лихачова (нині АМО) застосовували верстат АЛТК-Т. Така обробка на 20–30% підвищує твердість і в багато разів – зносостійкість оброблюваного матеріалу. Перевага лазерної термічної обробки полягає в здійсненні вибіркового впливу на різні ділянки оброблюваної деталі. Зокрема, можна обробляти контури отворів у головці блока циліндрів, не торкаючись основного металу.

Рис. 19. Схема лазерної термічної обробки



- 1 – деталь;
- 2 – витяжний патрубок;
- 3 – оброблювана поверхня;
- 4 – лазерна головка;
- 5 – сопло подачі аргону;
- 6 – контур оброблюваної поверхні

Сьогодні застосовують лазерні технологічні комплекси різних виробників. Актуальна також модернізація наявних комплексів, у першу чергу системи керування.

13. Застосування алюмінієвих сплавів в авіаційно-космічній техніці: нові розробки

Алюмінієві сплави донині залишаються основним конструкційним матеріалом, використовуваним в авіаційній та ракетній техніці. Обсяг їх застосування на сьогодні складає близько 70% від загальної кількості конструкційних матеріалів, використовуваних у літако- і ракетобудуванні. Для одержання гарної вагової ефективності в поєднанні з тривалим ресурсом роботи й надійністю в експлуатації необхідно, щоб алюмінієві сплави мали комплекс таких характеристик: висока питома міцність; достатня корозійна стійкість; високий опір циклічним навантаженням; мала швидкість розвитку тріщин від утомленості.

В авіакосмічній техніці України й країн СНД поширені ливарні та деформовні складнолеговані алюмінієві сплави. Найбільш перспективні серед них сплави системи $Al - Zn - Mg - Cu$, алюмінієво-літійові сплави систем $Al - Mg - Li$, $Al - Cu - Li - Mg$, $Al - Cu - Li$, а також сплави, леговані скандієм.

Перспективні матеріали, що складаються з тонких алюмінієвих листів і прошарків клейового препрега зі скляними волокнами – сплави марки СІАЛ (С – скло і АЛ – алюміній). За кордоном використовують аналогічний матеріал марки GLARE. Матеріали марки СІАЛ мають високу питому міцність і твердість, задовільну корозійну стійкість. Крім того, у цьому матеріалі не розвиваються тріщини. Використання цих матеріалів дозволяє змінити концепцію безпечної пошкоджуваності, тобто визначення величини тріщин, за якої можлива експлуатація літака, на концепцію недопущення появи тріщин у конструкції літака. Цей матеріал технологічно досить

освоєний; у вітчизняній промисловості наявні можливості для виготовлення з нього відсіків фюзеляжу практично будь-яких розмірів.

Водночас можна розглядати варіант виготовлення фюзеляжів із широких тонких панелей, зварюваних між собою лазерним зварюванням. У цьому випадку найкраще застосовувати сплави 1441 і АД37 (6013). Слід відзначити, що в сплаві 1424 знижується в'язкість руйнування після випробувань протягом 4 000 год за температури 85 °С, що імітують дію сонячного нагрівання за весь період експлуатації літаків. Крім того, різко збільшується швидкість утворення тріщин від утомленості в сплаві, поміщеному в корозійне середовище. Відтак сьогодні досліджують причини цього явища й підбирають режими термічної обробки, які стабілізують властивості сплаву 1424.

Щодо шпангоутів, то їх для більшості типів літаків виготовляють зі сплавів В93 і 1933. Інколи для цього використовують сплав АК6, який поступається за механічними властивостями й ступенем корозійної стійкості сплавам В93 і 1933. Сплав 1933 має високу в'язкість руйнування й перевершує за цією властивістю американські сплави аналогічного призначення – 7050Т74, 7175Т73, а також новий французький сплав 7040 (табл. 14). У 1998 році Самарський металургійний завод (Російська Федерація) спільно з Всеросійським інститутом авіаційних матеріалів (ВІАМ), фірмами “Aerospatiale” і “Airbus Industry” виготовив зі сплаву 1933 дуже складний за формою великогабаритний фітинг, який з'єднує крило літака з центропланом. Фітинг успішно пройшов складні сертифікаційні випробування у ВІАМі. Фірма “Aerospatiale” нині проводить підготовку до застосування фітингів зі сплаву 1933 на серійних європейських літаках А340 і А320.

Таблиця 14. Типові властивості масивних напівфабрикатів ($h = 150$ мм) із високоміцних сплавів, застосовуваних для виготовлення деталей типу шпангоутів

Сплав, стан	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ ,%	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}
1933 Т3	500/470	450/440	10/5	48/32
7040	–	450/440	–	33,5/26,0
7050 Т74	500/470	450/440	8/5	30/25
7175 Т73	450/350	370/350	7/5	40/28

Примітка. Значення σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ встановлено в поздовжньому напрямку (чисельник) і у висотному (знаменник). Значення K_{1C} оцінено в поздовжньо-поперечному напрямку (чисельник) і в висотно-поздовжньому (знаменник).

Активну роботу ведуть розробниками матеріалів й виробники літаків у сфері вдосконалення інших сплавів, застосовуваних у вітчизняному літакобудуванні – В96Ц3, 1468 і 1424. Результатом має стати перехід на виготовлення крил літаків із надміцного алюмінієвого сплаву В96Ц3 і надлегких сплавів системи $Al - Li$, а фюзеляжів – із композиційних матеріалів марки СІАЛ та зварених тонких пресованих панелей з алюмінієво-літєвих сплавів.

Баки великих ракет для рідкого кисню та рідкого водню виготовляють зі сплавів типу магнелію (АМг6) і сплаву 1201 системи $Al - Cu - Mg$. Однак за останні 10–15 років у світовій космонавтиці відбувся перехід до використання алюмінієво-літєвих сплавів. За даними на 1998 р., зі сплаву 2219 (1201) був виготовлений 91 бак системи космічних човників “Space Shuttle” діаметром 8 м і висотою 40 м, додатково 29 баків одержані з алюмінієво-літєвих сплавів. У 1998 р. фірма «Енергія» (Російська Федерація) під керівництвом ВІАМу виготовила кілька баків для рідкого кисню діаметром 4,5 м для американської фірми “Макдоннел Дуглас” з алюмінієво-літєвого сплаву типу 1460. Ці баки успішно пройшли наземні випробування за кімнатної температури й температури рідкого азоту, а також льотні випробування в США. Застосування алюмінієво-літєвого сплаву 1460 дало зниження маси бака на 37%. Ще кращі результати було отримано у випадку використання сплаву 1464. Порівняння властивостей сплавів АМг6, 1201 і 1464 (табл.15) показує явну перевагу сплаву 1464.

Таблиця 15. Властивості алюмінієвих сплавів для баків ракет

Сплав, стан	Температура випробування, °С	Напрямок вирізання зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}
АМг6(М)	20	П	320	160	15	–
	–196	Д, П	470	180	24	–
АМг6 (нагартований з $\delta = 20\%$)	20	П	400	300	9,0	–
1201	20	Д П	420 420	325 325	6,0 6,0	– 40
	–196	Д,П	530	450	12	–
1464	20	Д	570	535	9,5	65
		П	530	495	10,0	–
	45°	500	460	13,5	–	
–196	Д, П	615	525	17,5	–	

Примітка. Значення δ за температури -196 °С визначали тільки в поздовжньому (П) напрямку.

Дуже гарні результати отримали у випадку використання сплавів системи $Al-Mg-Sc$. Із цієї групи сплавів найбільш відомий сплав розробки Всеросійського інституту легких сплавів (ВІЛС) 01570 (1570). Наявність цифри 0 означає, що сплав дослідний, а відсутність – промисловий. На сьогодні в технічній літературі згадують обидві марки. Із даного сплаву виготовляють шпангоути ракет-носіїв різних класів (від легких до надважких), листи з нього застосовують для виготовлення баків і одержуваних згинанням і зварюванням з листа трубопроводів великого діаметра. Слід відзначити таку важливу перевагу сплавів системи $Al-Mg-Sc$ перед алюмінієвими сплавами, що містять літій, як значно менше зменшення зварного шва порівняно з основним матеріалом (до 30% порівняно з 40–50% і більше). Це дозволяє використовувати конструкції без збільшення або з мінімальним збільшенням перерізу зони зварного шва відносно основного матеріалу. Збільшення перерізу зони зварного шва легко забезпечити конструктивно й технологічно під час виготовлення панелей фюзеляжу літака, багаторазового ракетно-космічного літального апарата, бака ракети-носія, але у випадку виготовлення трубопроводів ракет-носіїв та інших тонкостінних оболонкових конструкцій зробити це можна не завжди. Крім того, сплави системи $Al-Mg-Sc$ набагато менш токсичні порівняно зі сплавами, які містять літій, що дуже важливо в процесі механічної обробки й зварювання; вони більш технологічні у випадку обробки тиском.

14. Високоміцні алюмінієві сплави системи $Al-Zn-Mg-Cu$

Сплави системи $Al-Zn-Mg-Cu$ поєднують у собі добру міцність, пластичність, високу в'язкість руйнування, малоциклову втому та корозійну стійкість. Цей комплекс властивостей було встановлено в результаті значних досліджень, які тривали десятки років. Промислові сплави $Al-Zn-Mg-Cu$ з'явилися в 40-х рр. ХХ ст. Вони мали високу міцність і водночас здатність до крихкого руйнування та корозійного розтріскування у великих перерізах. У перші роки їх застосування було зареєстровано багато випадків відриву крил у винищувачів і корозійних розтріскувань кованих вузлів у транспортних літаках. Цілі серії деяких типів літаків було вилучено з експлуатації.

Кардинально поліпшити властивості сплавів змогли шляхом різкого зниження вмісту домішок заліза і кремнію. З'явилися сплави підвищеної чистоти (пч) і дуже чисті (оч). Вони мали високу пластичність, в'язкість руйнування і поліпшені ливарні характеристики, що дозволило відливати круглі та плоскі зливки будь-яких розмірів.

Одним із найважливіших напрямків поліпшення комплексу властивостей була відмова від використання сплавів у стані максимальної міцності (досягають у процесі старіння – режим Т1) і перехід до зм'якшувальних режимів старіння (режими Т2 і Т3). При цьому мала місце

деяка втрата міцності, але істотно підвищувалися пластичність, в'язкість руйнування і корозійна стійкість сплавів.

Нині до групи високоміцних сплавів входять застосовувані для виготовлення верхньої обшивки крил та інших деталей сплави В95пч і В95оч режимів Т2 і Т3. Верхні обшивки крил виготовляють як із плит, так і з пресованих панелей. Поряд зі сплавами В92очТ2 для цього використовують сплав 1973 Т2 (табл. 16), у якому як антирекристалізатор застосовують цирконій замість хрому й марганцю в сплаві В95.

Таблиця 16. Типові властивості напівфабрикатів із високоміцних сплавів системи Al – Zn – Mg – Cu

Сплав	Напів-фабрикат	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	МЦУ, кциклів $\sigma_{max} = 158$ МПа	КПН, МПа
1973Т2 (типу7150Т76)	Панель, профіль	580	550	12	130	220	147
	Плита	560	520	10	124	220	147
	Лист	560	520	10	112	220	–
В95очТ2 (типа7475Т76)	Панель, профіль	560	510	12	130	200	172
	Плита	540	490	11	124	160	172
	Лист	540	490	11	112	160	–
В96Ц3Т2	Панель,	610	580	10	109	200	167
В96-3Т12 (типу7055Т77)	профіль	660	630	10	109	–	117
В96Ц-1Т2	Профіль	670	620	8	57	200	167

Примітка. Ширина зразка складає 500 мм; МЦУ – малоциклова утома; КПН – корозійна стійкість під напруженням.

Таблиця 17. Механічні властивості високоміцних алюмінієвих сплавів, застосовуваних для виготовлення штамповок малого перерізу

Сплав і режим термообробки	Орієнтація зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}
В93пчТ2	Д	441	402	8,0	31
	В	441	402	3,0	20
В93пчТ3	Д	412	333	9,0	34
	В	412	333	4,0	23
1933Т2	Д	490	441	7,0	39
	В	461	432	3,0	25

Сплав і режим термообробки	Орієнтація зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
1933Т3	Д	441	383	8,0	43,5
	В	412	383	3,0	24,8
1933Т22	Д	520	451	8,0	37
	В	500	431	4,0	22
01981Т2	Д	530	461	9,0	43,5
	В	510	451	5,0	30
7050Т74	Д	490	420	7,0	29
	В	460	380	4,0	24

Значно більш міцний, ніж сплави В95 і 1973, сплав В96Ц3Т1 також застосовують для виготовлення верхньої обшивки крил літаків і корпусів ракет (табл. 18).

Таблиця 18. Механічні властивості зразків зі сплаву В96Ц3Т1

Номер зразка	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		δ , %	
	Профіль	Панель	Профіль	Панель	Профіль	Панель
1	652	662	633	635	10,6	10,2
2	650	656	630	630	11,6	9,8
3	600	650	580	628	9,0	9,8
4	602	–	585	–	8,2	–
5	630	–	610	–	9,0	–

Високі характеристики має також сплав В96Ц1Т2, який протягом 40 років успішно використовують в атомній техніці (у конструкції центрифуг для розділення ізоотопів урану).

Листи зі сплавів В95оч і 1973 після спеціальної обробки мають задовільні надпластичні властивості, особливо сплав 01987Т2 з добавками скандію (табл. 19).

Таблиця 19. Властивості високоміцних сплавів для виробництва надпластичних листів

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Характеристики надпластичності			Метод виготовлення
			$\delta_{СП}$, %	ϵ , с ⁻¹	T, °С	
01987Т2	560	510	600	10 ⁻³	450–470	Традиційна технологія (природна надпластичність)
В95очТ2	520	470	350	10 ⁻⁴	470–480	Дослідна технологія

Примітка. $\delta_{СП}$ – відносне подовження в режимі надпластичності; ε - швидкість деформації.

Кувальні сплави В93пчТ2, В93пчТ3 і 1933Т2, 1933Т3 успішно застосовують для виробництва шпангоутів, фюзеляжів і кованих деталей. Сплав В93пч використовують у виробництві літаків, зокрема з нього виготовлено весь силовий каркас літака Ан-22 «Антей».

Сплав 1915, як видно з табл. 20, можна віднести до термічно зміцнених алюмінієвих сплавів середньої міцності. Оскільки в сплаві 1915 наявні добавки цирконію, здатність до утворення в ньому тріщин у процесі зварювання не вища, ніж у найкращих сплавів, зварюваних та не зміцнених термічною обробкою, наприклад, в АМг6. За міцністю основного матеріалу і зварних з'єднань сплав 1915 значно перевершує АМг6 і вигідно відрізняється від інших зварюваних і термічно зміцнених сплавів меншим зменшенням зварного з'єднання порівняно з основним матеріалом. Міцність зварних з'єднань зі сплаву 1915 після природного старіння складає не менше 90% міцності основного металу. Для сплаву 1915 характерна висока технологічність під час пресування профілів і труб; швидкість витікання металу досягає 25–30 м/хв, що в 10–15 разів перевищує швидкість витікання металу в ході пресування сплавів АМг5 і АМг6. Застосування сплаву 1915 замість АМг5 і АМг6 у зварних конструкціях не тільки поліпшує їх службові характеристики, а й створює передумови для значного збільшення обсягу виробництва пресованих напівфабрикатів на існуючому встаткуванні.

Сплав 1915 застосовують для виготовлення пресованих профілів і труб, у процесі чого максимально використовують його високі технологічні властивості, меншою мірою – для одержання листів та інших напівфабрикатів.

Таблиця 20. Типові механічні властивості сплаву 1915

Напівфабрикат	Природне старіння				Штучне старіння (165°C, 12–15 год)			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа
Пресовані профілі й труби	360	250	14	110	380	320	11	120
Листи	340	220	15	100	360	300	12	110

Для сплаву 1925, який має невисокий сумарний вміст цинку й магнію (як правило, менше 5,5%) і включає добавки марганцю, хрому та цирконію, характерна висока стійкість проти корозії під напруженням. Сплав 1925, призначений для виготовлення незварних конструкцій, являє собою більш дешеву модифікацію сплаву 1915. Оскільки в ньому допускається високий вміст домішок (Cu – до 0,8%; Fe – до 0,7%; Si – до 0,7%), то можна в процесі

виготовлення напівфабрикатів використовувати велику кількість відходів. Високий вміст домішок міді різко погіршує зварюваність, тому сплав 1925 не рекомендують для виготовлення зварних конструкцій. Сплав 1925 так само, як і сплав 1915, застосовують для виготовлення пресованих труб і профілів. Після загартування і природного старіння його механічні властивості стають близькими до властивостей сплаву 1915.

В останні роки на основі системи $Al - Zn - Mg$ ВІЛС розробив високоміцний зварюваний сплав 01970, що містить добавку скандію. За комплексом основних характеристик, таких як статична міцність ($\sigma_B, \sigma_{0,2}$), зварюваність, корозійна стійкість, в'язкість руйнування й опір утомі, сплав перевершує всі інші термічно зміцнювані зварювані сплави. Сплав рекомендують застосовувати для всіх видів деформованих напівфабрикатів: листів; плит; профілів; штамповок. Типовий рівень механічних властивостей листів зі сплаву 01970 такий: $\sigma_B^{3B}/\sigma_B^{очн} > 0,8$ без термообробки після зварювання; після загартування й штучного старіння: $\sigma_B = 480-510$ МПа; $\sigma_{0,2} = 400-450$ МПа; $\delta = 10-12\%$.

До системи $Al - Zn - Mg - Cu$ належить також сплав В91, що не є високоміцний, однак має високу пластичність, корозійну стійкість та міцність від утоми (табл. 21).

Таблиця 21. Властивості напівфабрикатів зі сплаву В91ТЗ

Напівфабрикат	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	ШРТУ $d(2l)/dN$, мм/кцикл ($\Delta K =$ $=31,2$ МПа·м ^{1/2})
Штамповки, профілі	440	370	12,0	40,0	4,23–4,49
Листи	430	360	12,0	$K_c^y = 88$ ($B=200$ мм)	4,28–4,70

Примітка. K_c^y – умовний коефіцієнт інтенсивності напружень; B – ширина зразка; $d(2l)/dN$ – швидкість розвитку тріщини утомленості; (ΔK – зміна коефіцієнта концентрації напружень).

Сплави системи $Al - Zn - Mg - Cu$ набули значного поширення у ракетно-космічній техніці. Сплави типу В96 використовують для виготовлення незварних конструкцій, наприклад клепаних перехідних відсіків ракет-носіїв, деталей вузлів автоматики, кронштейнів та ін.

15. Алюмінієві сплави, леговані літієм

На сьогодні розроблено промислові сплави з літієм 3 систем: $Al - Li - Mg$, $Al - Li - Cu - Mg$ і $Al - Li - Cu$. Ці сплави мають низьку густину: $2\,520\text{ кг/м}^3$ і підвищений модуль пружності (80 000 МПа).

До системи $Al - Li - Mg$ відносять сплави 1420 декількох модифікацій і сплави 1421, 1423 зі скандієм. Усі сплави системи $Al - Li - Mg$ мають густину, на 10–12% нижчу, ніж класичний сплав Д16 (2024), високу корозійну стійкість, гарну зварюваність, середню міцність, малу швидкість розвитку тріщин від утомленості (ШРТУ), високий опір малоцикловим навантаженням (МЦН). Після певної термопластичної обробки вони набувають надпластичності. Сплав 1420 уперше застосували в 1971 р. у фюзеляжі літака вертикального злету Як-36. Клепаний фюзеляж виготовляли зі штампованих вафельних панелей. Зниження маси досягало 16%. Літаки Як-36 базувалися на кораблях у трюмі й на палубі. Кораблі здійснювали походи в усіх кліматичних поясах з різними умовами щодо температури, вологості, солоності морської води. Після багатьох років експлуатації на деталях, виготовлених зі сплаву 1420, не було виявлено корозійних пошкоджень.

Пізніше зі сплаву 1420 було виготовлено зварну модифікацію літака МиГ-29, фюзеляж якого складався з декількох зварених баків. Верх і низ бака утворювали пресовані панелі, торці й інші деталі-штамповки. Було досягнуте загальне зниження маси на 24% порівняно з клепанним фюзеляжем зі сплаву Д16, у тому числі 12% за рахунок меншої питомої маси сплаву, ще 12% – у результаті усунення герметиків, заклепок і болтів, а також за рахунок відсутності напусток під час з'єднання деталей. Низку деталей літака Ту-204 також виготовлено зі сплаву 1420. Подальшим розвитком сплавів системи $Al - Li - Mg$ став зварюваний сплав 1424.

До системи $Al - Li - Cu - Mg$ належать сплави 1430 і 1441 (табл. 22). Найбільшого поширення набув сплав 1441; з усіх алюмінієво-літієвих сплавів він має найкращі технологічні властивості: до нього застосовний метод гарячої та холодної рулонної прокатки (товщина листів 0,5–0,6 мм). Із цього сплаву виготовляють деталі військових літаків і фюзеляжі літаків-амфібій. У Конструкторському бюро ім. А.М. Туполева й у НАСА (США) пройшли випробування клепаних панелей в умовах, що імітують роботу фюзеляжу. Ці панелі витримали 150 тис. циклів навантаження, і випробування продовжуються, аналогічна ж панель зі сплаву 1163 (типу Д16-2024) витримала всього 90 тис. циклів. Сплав 1441 можна успішно застосовувати для виготовлення обшивки фюзеляжу та нижніх панелей крила.

Таблиця 22. Типові властивості листів зі сплаву 1441

Лист (товщина, мм)	Умови нагрівання	Орієнтація зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	K_{CO} , МПа·м ^{1/2}	МЦН, кцикл $\sigma_{max} =$ =160 МПа)	ШРТУ мм/кцикл ($\Delta K=31$ МПа·м ^{1/2})
Неплакований (1,2)	Без нагрівання	Д	410	320	17,6	102,3	–	1,65
		П	419	314	6,2	98,2	–	1,1
	85°С, 1000год	Д	442	347	4,4	96,6	–	2,53
		П	461	359	2,9	89,3	–	2,01
Плакований (2,5)	Без нагрівання	Д	401	326	5,4	–	239	1,17
		П	412	307	5,1	–	205	0,73
		45°	396	283	7,0	–	210	–
	85°С, 1000год	Д	434	355	13,0	–	141	–
		П	448	340	2,2	–	–	–
		45°	431	307	2,9	–	–	–
Плакований (4,0)	Без нагрівання	Д	426	359	16,0	–	186	0,92
		П	452	372	12,4	–	120	0,5
		45°	422	325	18,7	–	174	–
Плакований (4,0)	85°С, 1000год	Д	460	384	11,4	–	115	–
		П	480	386	10,7	–	–	–
		45°	466	355	15,4	–	–	–
Неплакований (4,0)	Без нагрівання	Д	424	346	13,9	105,7	–	0,94
		П	433	331	11,2	–	–	0,75
		45°	425	319	15,3	–	–	–
Неплакований (7,0)	Без нагрівання	Д	453	365	11,2	–	437	1,06
		П	469	362	7,8	–	405	0,6
		45°	447	315	16,8	–	190	–
	85°С, 1000год	Д	480	386	7,7	–	297	–
		П	497	385	5,6	–	–	–
		45°	470	341	13,5	–	–	–

До системи *Al-Li-Cu* відносять сплави 1450 і 1460. Сплав 1450 застосовано в літаках КБ ім. О.К. Антонова у вигляді стрингерів – поздовжніх силових елементів, наприклад, фюзеляжу літака або корпусу судна. Найбільші роботи проведено з упровадження сплаву 1460 (густина 2630 кг/м³; модуль пружності 97 000 МПа). Із нього виготовлено в об'єднанні «Енергія» баки для рідкого кисню американської ракети-носія «Дельта».

Для взаємодії літію з алюмінієм у подвійних сплавах характерна висока змінна розчинність літію у твердому алюмінії (рис. 20). За граничною розчинністю у твердому алюмінії (за евтектичної температури) літій серед усіх металів знаходиться на четвертому місці (після цинку, срібла і магнію). Як відомо, змінна розчинність у твердому алюмінії легуючого елемента, особливо того, що знаходиться в сплаві у вигляді інтерметалідної фази ($AlLi$ у системі $Al - Li$), становить необхідну умову для зміцнення сплаву термічною обробкою. Крім того, сплави алюмінію з літієм, який належить до лужних, хімічно активних металів, інтенсивно взаємодіють з киснем, воднем та іншими елементами зовнішнього середовища. Ці сплави складні в технології виробництва і потребують спеціальних засобів захисту під час плавки й лиття. Однак роботи з легування алюмінієвих сплавів літієм, розпочаті ще в 20-х рр. у Німеччині, продовжували тривалий час.

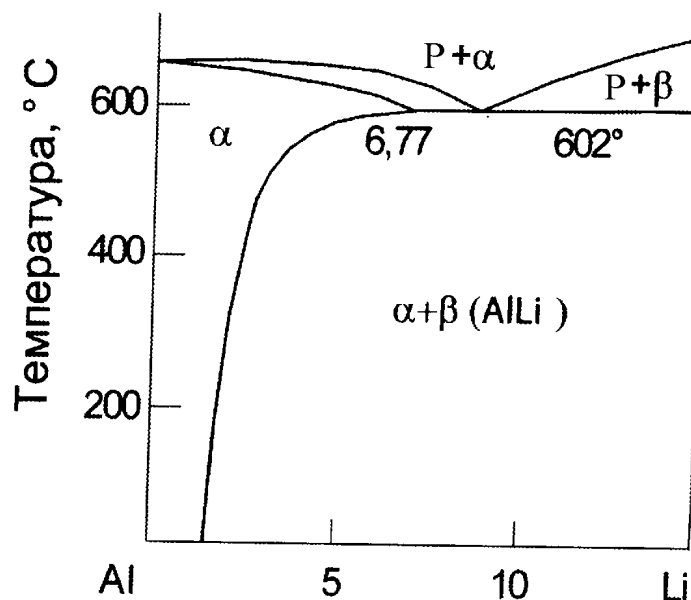


Рис. 20. Діаграма стану системи $Al - Li$

Підставою для цього був той факт, що добавки літію значно підвищують модуль пружності й знижують густину алюмінієвих сплавів. Зокрема, було встановлено, що кожен відсоток літію на 3% підвищує модуль пружності й на 6% знижує густину. Але тільки в 50-х рр. ХХ ст. на основі системи $Al - Cu - Li$ було розроблено перші сплави з літієм, що пройшли промислові випробування. Це були сплави 2020 (США) і ВАД23 (СРСР), що містили близько 5% Cu , 1,2% Li і добавки Mn і Cd .

Незважаючи на високу міцність (σ_B до 600 МПа, $\sigma_{0,2}$ до 550 МПа), помітного поширення ці сплави не набули через низьку пластичність, погану технологічність, велику анізотропію властивостей напівфабрикатів. Першим сплавом, який застосували в промисловості й застосовують у літакобудуванні дотепер, став сплав 1420, розроблений на основі системи $Al - Mg - Li$ у ВІАМі.

Сплави системи Al – Mg – Li

Співробітники ВІАМу в системі *Al – Mg – Li* виявили широку концентраційну область сплавів, що мають значний ефект зміцнення в процесі термічної обробки (рис. 21). При цьому вони встановили, що вміст магнію, істотно впливаючи на міцність сплавів у загартованому стані, практично не робить впливу на ефект старіння, який зумовлює зростання межі плинності. Останній залежить в основному від концентрації літію і виникає за її значення від 1,0 до 2,8%. Й.Н. Фрідляндер, В.Ф. Шамрай, Н.В. Ширяєва запропонували перший сплав на основі цієї системи – 1420.

Сплав має такий номінальний склад: 5,5% Mg; 2,1% Li; 0,12% Zr; основа – Al. Фазовий склад сплаву 1420 у рівноважних умовах за температури 430 °С, як показано на рис. 20, представлено фазою α -Al + $S_1(Al_2MgLi)$. Сплав 1420 піддають загартуванню від температури 450 °С і наступному штучному старінню за температури 120 °С протягом 10 – 15 год. Твердий розчин у сплаві 1420 дуже стійкий, і охолодження на повітрі достатньо для фіксації одержаного під час нагрівання під загартування твердого розчину за кімнатної температури. Охолодження в процесі гартування на повітрі забезпечує більш високу корозійну стійкість напівфабрикатів.

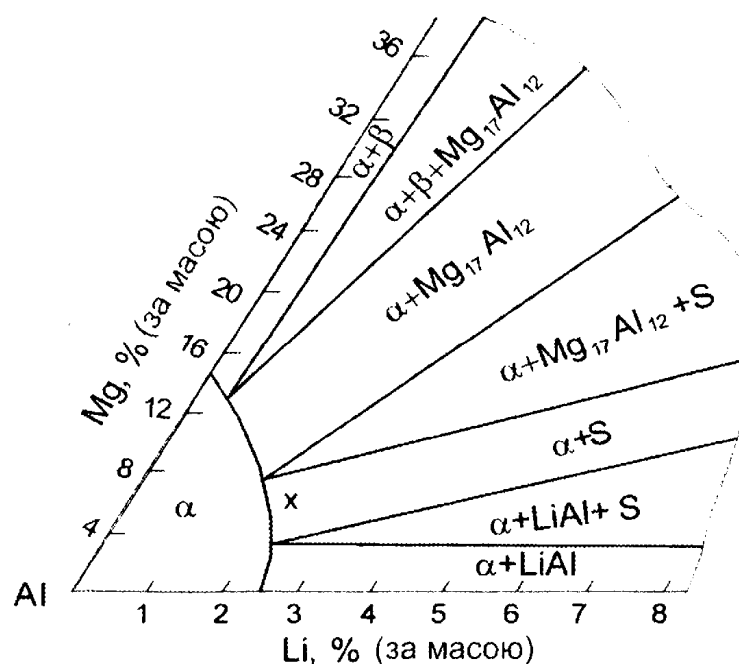


Рис. 20. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Al – Mg – Li за температури 430 °С
x – сплав 1420

Водночас установлено, що в сплаві 1420 безпосередньо після загартування у воді наявна певна кількість дисперсних виділень проміжної зміцнювальної фази $\delta'(Al_3Li)$. Розпад пересиченого твердого розчину в сплаві

1420 відбувається за такою схемою: $\alpha\text{-Al} \rightarrow \delta'(\text{Al}_3\text{Li}) \rightarrow S'(\text{Al}_2\text{MgLi}) \rightarrow S_1(\text{Al}_2\text{MgLi})$. Фаза $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$ – проміжна метастабільна фаза, що має кубічну решітку літію, параметр якої близький до параметра решітки алюмінію. Тому виділення $\delta'(\text{Al}_3\text{Li})$, що утворюються у твердому розчині в процесі охолодження охолодження від температури загартування й у процесі наступного старіння, цілком когерентні з матрицею й залишаються такими в широкому діапазоні температур старіння.

Друга зміцнювальна – S_1' -фаза, що має складну кубічну решітку й утворюється з δ' -виділень або виділяється безпосередньо з твердого розчину; вона частково когерентна матриці. Величина частинок зміцнювальної δ' -фази після штучного старіння коливається в межах 10–30 нм, а S_1' - фази – у межах 30–60 нм. На ранній стадії виділення δ' -фази здійснюють незначне зміцнення, тому зміцнення сплаву 1420 під час природного старіння практично відсутнє. Після термічної обробки сплав 1420 має міцність, близьку до міцності основного літакового сплаву дуралюмінію Д16, за меншої густини й більш високого модуля пружності (табл. 23).

Відзначимо, що попереду в ході аналізу властивостей алюмінієвих сплавів значення модуля пружності ми не наводили. Для алюмінію і всіх розглянутих вище сплавів модуль пружності практично однаковий.

Модуль пружності сплаву залежить від модуля пружності основи і легуючих елементів. Сумарний вміст легуючих елементів в алюмінієвих сплавах відносно невеликий, причому модулі пружності цих елементів відрізняються неістотно від модуля пружності алюмінію. Тому зміни модуля пружності алюмінію, пов'язані з уведенням легуючих елементів, дуже малі й знаходяться в межах похибки експерименту. Для всіх розглянутих вище сплавів у довідниках наводяться значення модуля пружності E в межах від 69 000 до 72 000 МПа. Виняток становлять алюмінієві сплави з літієм. Відносно невеликий вміст літію зумовлює істотне й стійке підвищення модуля пружності (табл. 23).

Таблиця 23. Властивості сплавів 1420 і Д16 після загартування і штучного старіння

Сплав	Напів-фабрикат	Густина, кг/м ³	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа	E , МПа	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
1420	Штамповки	2 480	440	275	12	–	75 000	25
	Листи, плити	2 480	430	265	10	120	75 000	25
Д16	Листи, плити	2 780	430	320	18	140	69 000	37

Значне підвищення модуля пружності в результаті легування алюмінієвих сплавів літієм можна пояснити особливою природою твердого розчину літію в алюмінії. Крім металічного міжатомного зв'язку у твердому розчині літію в алюмінії діють інші, більш міцні зв'язки типу іонного або ковалентного. Підставою для такого пояснення служить, по-перше, надзвичайно низька електро- і теплопровідність алюмінієво-літієвих сплавів порівняно з іншими алюмінієвими сплавами (наприклад, сплав 1420 після загартування має електропровідність 8–9 Ом/м, тоді як Д16 – 16 Ом/м), по-друге, утворення в алюмінієво-літієвих сплавах за низькотемпературного старіння областей упорядкованого твердого розчину, які періодично чергуються.

Велика перевага сплаву 1420 порівняно з іншими алюмінієвими сплавами – мала густина. У раніше розглянутих сплавів вона коливається в межах від 2 640 кг/м³ (АМГ6) до 2 890 кг/м³ (В96Ц). Густина сплаву 1420 менша ніж 2 500 кг/м³. Сплав 1420 має високу загальну корозійну стійкість (після загартування на повітрі); його піддають зварюванню всіма відомими способами. Поєднання високої міцності з малою густиною, притаманне сплаву 1420, викликає великий інтерес в авіаційних конструкторів. Заміна сплаву Д16 на 1420 у тих або інших вузлах літаків дозволяє одержати економію в масі конструкції до 10%.

Сплав 1420, як і інші алюмінієво-літієві сплави, недостатньо технологічний у металургійному виробництві. Дуже сильне окиснення сплаву в процесі плавки і лиття, низька пластичність у нагрітому й особливо в холодному стані вимагають розробки особливих технологічних прийомів і спеціального металургійного встаткування. Наприклад, технологію виробництва листів зі сплаву 1420 не освоєно дотепер.

Сплави систем Al – Cu – Li і Al – Cu – Mg – Li

Наприкінці 70-х – на початку 80-х р. ХХ ст. було розроблено сплави на основі систем Al – Cu – Li і Al – Cu – Mg – Li – сплави нового покоління, що відмінні від раніше відомих сплавів нижчим вмістом міді, вищим вмістом літію й вищою чистотою за домішками заліза й кремнію. Найбільшого поширення у вітчизняному літакобудуванні набули сплави 1450, 1440 (табл. 24).

Таблиця 24. Середній хімічний склад сплавів системи Al – Cu – Li і Al – Cu – Mg – Li нового покоління

Сплав	Вміст компонентів, % мас.				Домішки, % мас.			
	Cu	Mg	Li	Zr	Інші	Fe	Si	Na
1450	3,0	–	2,05	0,11	Ce, Ti, Be	<0,15	<0,1	< 0,0008
1440	1,55	0,85	2,35	0,12	Ti, Be	<0,15	<0,1	

У рівноважних умовах фазовий склад сплаву 1450 відповідно до діаграми стану $Al - Cu - Li$ такий: $\alpha-Al + T_1 + T_2$ (без урахування невеликих добавок Zr, Ce й ін.). Твердий розчин міді й літію в алюмінії співіснує з 2 потрійними сполуками – $T_1(Al_2CuLi)$ і $T_2(Al_6CuLi_3)$. За температури нагрівання сплаву 1450 під загартування (до $530^\circ C$) фази T_1 і T_2 практично повністю розчиняються, і за температури $530^\circ C$ співіснують α -твердий розчин і вторинні виділення цирконієвої фази $\beta(Al_3Zr)$. Виділення фази $\beta(Al_3Zr)$ не беруть участі в процесах зміцнення під час термообробки.

16. Нові алюмінієві сплави, леговані скандієм

Підвищення міцності алюмінію в ході розробки сплавів на його основі стало можливим завдяки високій пластичності алюмінію, що має кристалічну структуру гранецентрованого куба (ГЦК), сприятливу для дислокаційного механізму ковзання. Після того як було проведено численні теоретичні й експериментальні дослідження алюмінієвих сплавів і створено найбільш високоміцні сплави системи $Al-Zn-Mg-Cu$, певний час вважали, що подальше істотне підвищення міцності алюмінієвих сплавів неможливе. Однак в останні десятиліття значних успіхів було досягнуто в результаті мікролегування алюмінію і його сплавів скандієм. Сучасні сплави алюмінію – це багатокомпонентні системи, тому легування скандієм має деякі специфічні особливості для різних сплавів, зумовлені взаємодією скандію з іншими елементами.

Фізико-хімічні властивості скандію

Скандій (Sc) – хімічний елемент III групи періодичної системи елементів з порядковим номером 21. Стабільний ізотоп Sc^{45} . У вільному стані Sc – це метал із температурою плавлення $1\,540^\circ C$ і температурою кипіння $2\,700^\circ C$. Густина скандію $3\,020\text{ кг/м}^3$. Скандій існує у 2 кристалічних модифікаціях. Гексагональна щільноупакована кристалічна решітка з параметрами $a = 0,3309\text{ нм}$ і $c = 0,5268\text{ нм}$ стабільна до температури $1334^\circ C$, вище цієї температури утворюється стабільна об'ємно центрована кубічна решітка з параметром $a = 0,4541\text{ нм}$. Скандій знаходиться в тій же групі періодичної системи елементів, що й алюміній. Конфігурація електронних оболонок у скандію $5d^1 6s^2$.

Вміст скандію в земній корі – $6 \cdot 10^{-4}\%$, він зустрічається як розсіяний елемент у кількості до $0,5\%$ у багатьох мінералах. Найбільш поширена лігатура $Al + 2\% Sc$ (виробляють у вигляді зливків масою 5 кг). Оскільки розчинність Sc в Al складає $0,3\%$, то в лігатурі завжди наявний інтерметалід Al_3Sc . Розміри частинок інтерметаліду Al_3Sc не повинні перевищувати 20 мкм для того, щоб у процесі плавки ці частинки легко розчинялися без перегріву розплаву.

Фізико–хімічні основи підвищення механічних властивостей алюмінієвих сплавів у результаті їх легуванні скандієм

Відповідно до діаграми стану $Al-Sc$ максимальна розчинність скандію в алюмінії складає 0,3%, а евтектична реакція $P(\text{рідина}) \leftrightarrow \alpha + Al_3Sc$ спостерігається в сплаві $Al + 0,55\% Sc$. Сплави системи $Al-Sc$ містять менше 0,3% Sc . У цьому випадку, після охолодження і процесу старіння, сплав складається з $\alpha - Al$ і дисперсних виділень Al_3Sc .

Наявність первинних виділень Al_3Sc за концентрації скандію понад 0,55% приводить до значного зменшення розміру зерен у литому стані. Однак у разі наявності інших легуючих елементів (особливо Ti , Zr , Hf) критична концентрація скандію, за якої різко подрібнюється зерно, істотно зменшується.

Після загартування алюмінієво-скандієвих сплавів від температури 610 – 620 °С або після швидкої кристалізації в сплавах, що містять 0,3% скандію і менше, вдається уникнути розпаду твердого розчину з виділенням частинок інтерметаліду Al_3Sc . У процесі старіння загартованих сплавів виділяються вторинні частинки Al_3Sc . Оптимальна температура старіння складає 300 °С. Оскільки в складнолегованих сплавах алюмінію температура плавлення нижча 600 °С, загартування від передплавильних температур не спричиняє в цих сплавах переходу скандію у твердий розчин, і вторинні виділення Al_3Sc утворюються тільки в ході старіння сплаву після швидкої кристалізації або під час деформаційного старіння.

Особливості впливу скандію на сплави алюмінію визначає електронна будова скандію. Інтерметаліди алюмінію з решіткою типу $AlCu_3$ формуються крім скандію тільки з 3 елементами періодичної системи. Це лантаноїди ербій(Er), тулій (Tm) та ітербій (Yb), але останні практично нерозчинні в алюмінії (менше 0,05 % за температури солідуса). Досить велику розчинність скандію в більшості елементів періодичної системи пов'язують із малим атомним радіусом, обумовленим його електронною будовою.

Скандій за фізико–механічними властивостями являє собою аналог ітрию та рідкісноземельних елементів. Легування алюмінію скандієм має певні особливості, властиві легуванню перехідними металами: малий температурний інтервал кристалізації твердих розчинів (близько 5°С); відносно низька, але помітна розчинність металу в алюмінії; різке зниження розчинності зі зниженням температури; здатність до утворення пересичених твердих розчинів; уповільнення дифузійних процесів у твердому розчині алюмінію. Маючи всі позитивні якості перехідних металів, застосовуваних для легування сплавів алюмінію, скандій відзначається істотними перевагами з огляду на властивості інтерметаліду Al_3Sc .

Решітка інтерметаліду Al_3Sc ізоморфна решітці алюмінію за незначного (на 1,4%) перевищення параметра. Тому первинні частинки Al_3Sc чинять модифікувальний вплив під час кристалізації легованих скандієм алюмінієвих сплавів і зумовлюють подрібнення зернистої структури зливка. Вторинні частинки Al_3Sc , що виділяються з пересиченого твердого розчину в

ході термічної обробки, довго зберігають когерентний зв'язок із матрицею й повільно ростуть. Виділення вторинних частинок Al_3Sc обумовлює найбільше зміцнення алюмінієвої матриці порівняно з іншими елементами періодичної системи. Дійсно, збільшення межі плинності алюмінію на 1 ат. % Sc дорівнює 1 000 МПа/ат. %, що істотно перевищує вплив інших елементів. Наявність дисперсних когерентно зв'язаних із матрицею частинок Al_3Sc закріплює дислокаційні субграниці й зумовлює розвиток у деформованих сплавах дрібної комірчастої структури. Ці властивості Al_3Sc відкривають можливості для поліпшення комплексу властивостей сплавів методами термічної обробки із здійсненням гартівного й деформаційного старіння. Додаткового поліпшення властивостей сплавів досягають у процесі легування їх скандієм у поєднанні з іншими перехідними металами (Zr, Mn, Ti та ін.).

Слід зазначити, що атоми скандію у твердому розчині алюмінію мають максимальну енергію зв'язку з вакансією (табл. 25), що на думку дослідників, може забезпечити додаткове зміцнення під час легування алюмінію скандієм, однак це питання вивчено недостатньо.

Таблиця 25. Енергія зв'язку між вакансією і розчиненими атомами різних елементів у $\alpha - Al$

Елемент	Sc	Mg	Si	Cu	Zn
U , eV	0,35	0,29	0,26	0,20	0,28

Позитивний вплив скандію на властивості сплавів алюмінію має комплексний характер. Так, добавки скандію не тільки підвищують межу плинності й межу міцності, але й поліпшують оброблюваність сплаву і його технологічну пластичність, дозволяють зменшити розмір зерна в литому стані й у зварному шві, значно підвищують температуру рекристалізації. Добавки скандію істотно підвищують зварюваність алюмінієвих сплавів. Підвищення зварюваності обумовлено зменшенням розміру зерен у зварному шві й зменшенням зони термічного впливу у зв'язку з підвищеною температурою рекристалізації. У результаті сплави стають менш схильні до утворення гарячих тріщин у процесі зварювання, а механічні властивості зварного з'єднання за кімнатної температури зростають.

Сучасні алюмінієві сплави багатокомпонентні, тому в разі легування їх скандієм треба враховувати зміцнювальний вплив інших елементів та істотно корегувати режими термомеханічної обробки сплавів.

Скандій можна вводити в алюмінієві сплави різних систем. Із погляду застосування в ракетно-космічній техніці найбільший інтерес становлять сплави системи $Al-Mg-Sc$. Із цих сплавів, як було відзначено вище, найбільш відомий сплав 01570 розробки ВІЛСу. Цей сплав за складом близький до сплаву АМг6, але містить, крім того, 0,3–0,5 % Sc. Межа плинності сплаву складає 270–280 МПа, межа міцності – до 380 МПа, корозійна стійкість аналогічна стійкості сплаву АМг6. Сплав 01570 зварюють зі сплавом АМг6 аргонодуговим зварюванням із використанням присадного матеріалу як зі

сплаву АМгб, так і зі сплаву 01570 або 01576 з підвищеним вмістом скандію. До того ж це дозволяє використовувати їх спільно: для найбільш навантажених деталей – 01570, для менш навантажених – АМгб. Останнє, у свою чергу, дає можливість значно здешевшити виробу ракетно–космічної техніки порівняно з використанням тільки сплаву 01570, із забезпеченням заданих технічних характеристик. Сплави системи *Al–Mg–Sc* за умови здешевлення їх виробництва зможуть великою мірою замінити звичні сьогодні сплави типу АМгб, Д16, В96. Більше того, з їх застосуванням сферу використання алюмінієвих сплавів можна істотно розширити з огляду на можливість виготовлення зварних конструкцій із високоміцного сплаву. Нині в галузі створення сплавів системи *Al–Mg–Sc* проводять дослідження стосовно варіювання вмісту скандію й підбору комбінацій легуючих елементів, які дозволили б забезпечити необхідний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей за одночасного зниження ціни напівфабрикатів до величини, порівнянної з ціною виробів зі сплаву АМгб.

Висновки

Алюмінієві сплави становлять основний конструкційний матеріал для виробництва ракет-носіїв і літаків. Зокрема, їх застосовують під час виготовлення космічних літальних апаратів, у тому числі й багаторазових. Розширено сферу використання алюмінієвих сплавів і в інших галузях техніки, наприклад у залізничному транспорті. З урахуванням того, що швидкість сучасних швидкісних потягів може складати 200 км/год і навіть 400 км/год, цілком закономірним стає застосування авіаційних матеріалів у виготовленні локомотивів і рухомого складу залізниць. Також великі перспективи має використання алюмінієвих сплавів у суднобудуванні, особливо в процесі виготовлення швидкісних суден. Без застосування алюмінієвих сплавів складно уявити й сучасну військову техніку. Алюмінієві сплави використовують і для виготовлення побутових предметів: посуду, сантехнічних виробів, металопластикових вікон. Алюміній і його сплави також входять до складу різних композиційних матеріалів, наносяться у вигляді різноманітних покриттів на металеві вироби.

Поліпшити властивості алюмінієвих сплавів можна як у процесі зміни їх складу, так і в результаті застосування принципово нових технологій їх одержання й обробки. Алюмінієві сплави вдосконалюють шляхом зміни їх складу за такими напрямками: пошук нових легуючих елементів; очистка сплавів від шкідливих домішок; мікролегування; модифікування. До принципово нових технологій можна віднести синергетичні способи обробки матеріалів, гранульну технологію, променеві методи зміцнення, наномодифікування.

Контрольні питання й завдання

1. Назвіть основні легуючі елементи в алюмінієвих сплавах.
2. Які основні домішки містять алюмінієві сплави?
3. Як змінюються властивості сплаву АМг6 у процесі холодної деформації?
4. Проаналізуйте принцип класифікації алюмінієвих сплавів.
5. Назвіть види відпалу виливків
6. Від чого залежить величина зерна алюмінію?
7. Назвіть основні лінії діаграми $Al-Si$.
8. Як визначають температуру гартування дуралюмінів?
9. Чим розрізняються режими термічної обробки Т1 і Т6?
10. Які алюмінієві сплави належать до термічно не зміцнюваних?
11. Розкрийте особливості діаграм стану ливарних алюмінієвих сплавів.
12. Нарисуйте діаграму стану $Al-Si$.
13. Назвіть відмінності між доевтектичними та евтектичними силумінами.
14. Які фази утворюються в сплавах системи $Al-Si-Mn$?
15. Як забезпечити високу жароміцність силумінів?
16. Які фази є зміцнювальні в алюмінієвих сплавах?
17. Проаналізуйте переваги сплавів системи $Al-Li$ перед іншими алюмінієвими сплавами.
18. Які переваги має легування сплавів скандієм?
19. Назвіть високоміцні зварювані алюмінієві сплави.

Список рекомендованої літератури

Авіаційно-космічні матеріали та технології [Текст]/ В.О. Богуслаєв [та ін.] – Запоріжжя: Вид-во ВАТ “Мотор Січ”, 2009. – 383 с.

Азанова, Л.Б. Разработка алюминиевого сплава 1570 [Текст] /Л.Б. Азанова, Е.Г. Бобошко, Т.М. Челапко // 2-га Всеукр. молодіж. наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Людина і космос”: зб. тез. – Д. 2000. – С. 202.

Алюміній та сплави на його основі [Текст]: навч. посіб./ В.З. Куцова [та ін.] – Д.: НМетАУ, 2004. – 135 с.

Анализ несущей способности прессованных профилей из быстрозакристаллизованного алюминий-литиевого сплава для применения в изделиях аэрокосмической техники [Текст] /В.Н. Бутрим, В.Н. Мироненко, А.С. Кирилянчик, О.П. Баженова // 5-й Междунар. аэрокосм. конгр.: тез. докл. – Юбилейный Моск. обл., 2006. – С. 142

Долженков, И.Е. Оборудование термических цехов [Текст]: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / И.Е. Долженков, В.И. Большаков, В.И. Долженков. – Д.: ПГАСиА, 2004. – 320 с.

Ковшов, А.Н. Технология машиностроения [Текст]: учеб. для

студентов машиностроит. специальностей вузов/ А.Н. Ковшов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

Лимаренко, А.Л. Анализ возможности применения алюминиево-литиевых сплавов в ракетно-космической технике [Текст] /А.Л. Лимаренко, Е.Г. Бобошко // 2-га Всеукр. молодіж. наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Людина і космос”: зб. тез. – Д. 2000. – С. 203.

Лимаренко, А.Л. Свойства и структура высокопрочного свариваемого алюминиево-литиевого сплава 1460 [Текст] / А.Л. Лимаренко, В.Г. Ситало, Т.Н. Литвишко// Матеріали 3-ї Міжнар. молодіж. наук.-практ. конф. “Людина і Космос”. Дод. до журн. “Космічна наука і технологія”. – К., 2002. – Т.8, № 1. – С. 123–126.

Перспективный алюминиево-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций авиа-космической техники. [Текст] / В.В. Кошкин [и др.]// 5-й Междунар. аэрокосм. конгр.: тез. докл. – (Юбилейный Моск.обл.), 2006. – С. 158.

Синергетическая трактовка комплексной энергетической обработки сплава АМгбМ [Текст] / Е.С. Переверзев, Д.Г. Борщевская, В.Д. Рябчий, С.П. Федий //Матеріали конф. “Математичні проблеми технічної механіки–2005”. – Дніпропетровськ; Дніпродзержинськ, 2005. – С. 119.

Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології [Текст]: Підручник / Ф. П. Санін, Л.Д. Кучма, Є.О. Джур, А.Ф. Санін.– Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 1999. – 320 с.

Филатов, Ю.А. Алюминиевые сплавы на основе систем Al–Mg–Sc і Al–Zn–Mg–Sc и перспективы их применения в аэрокосмической технике [Текст] /Ю.А.Филатов // 5-й Междунар. аэрокосм. конгр.: тез. докл. – Юбилейный (Моск. обл.), 2006. – С. 151.

Фридляндер, И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике [Текст] И.Н. Фридляндер// Вестн. Рос. акад. наук. – 2004. – Т. 74, № 12.– С. 1076–1081.

Черненко, В.С. Променеві методи обробки [Текст]: навч. посіб./ В.С. Черненко, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка. – К.: Кондор, 2004. – 166 с.

Зміст

Вступ	3
Основні фізико-механічні властивості алюмінію	4
Легуючі елементи в сплавах алюмінію	6
Структура й властивості литих алюмінієвих сплавів	10
Гаряча і холодна обробка алюмінієвих сплавів тиском	11
Класифікація алюмінієвих сплавів	13
Принципи маркування алюмінієвих сплавів	14
Термічна обробка алюмінієвих сплавів	16
Деформовні сплави, не зміцнювані термічною обробкою	21
Сплави на основі системи Al – Cu	24
Сплави системи Al – Si (силуміни)	26
Поршневі ливарні силуміни	31
Пічне обладнання для термічної обробки деталей і заготовок з алюмінієвих сплавів	36
Застосування алюмінієвих сплавів в авіаційно-космічній техніці: нові розробки	43
Високоміцні алюмінієві сплави системи Al– Zn–Mg–Cu	46
Алюмінієві сплави, леговані літієм	51
Нові алюмінієві сплави, леговані скандієм	57
Висновки	60
Контрольні запитання й завдання	61
Список рекомендованої літератури	62
Зміст	63

Охарактеризовано хімічний склад, властивості та режими обробки деформовних і ливарних алюмінієвих сплавів. Описано обладнання для їх термічної обробки. Розглянуто сфери застосування різних алюмінієвих сплавів в авіаційній й ракетно-космічній техніці та перспективи їх розвитку

Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, які навчаються за напрямом “Інженерне матеріалознавство” та спеціальністю “Прикладне матеріалознавство”.

Темплан 2011, поз. 5

Навчальне видання

Наталія Євграфівна Калініна, Олег Віталійович Бондаренко

**Використання алюмінієвих сплавів
в авіаційній та ракетно-космічній техніці**

Навчальний посібник

Редактор О.В. Бец
Техредактор Л.П. Замятіна
Коректор А.А. Гриженко

Підписано до друку . Формат 60×84/16. Папір друкарський
Друк плоский. Ум. друк. арк. 3,5. Ум. фарбовідб. 3,5. Обл.-вид. арк.
Тираж 100 пр. Зам. №

РВВ ДНУ, просп. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49010.
Друкарня ДНУ, вул. Наукова, 5, м. Дніпропетровськ, 49050