

Unità 1 Materiali per l'industria aeronautica

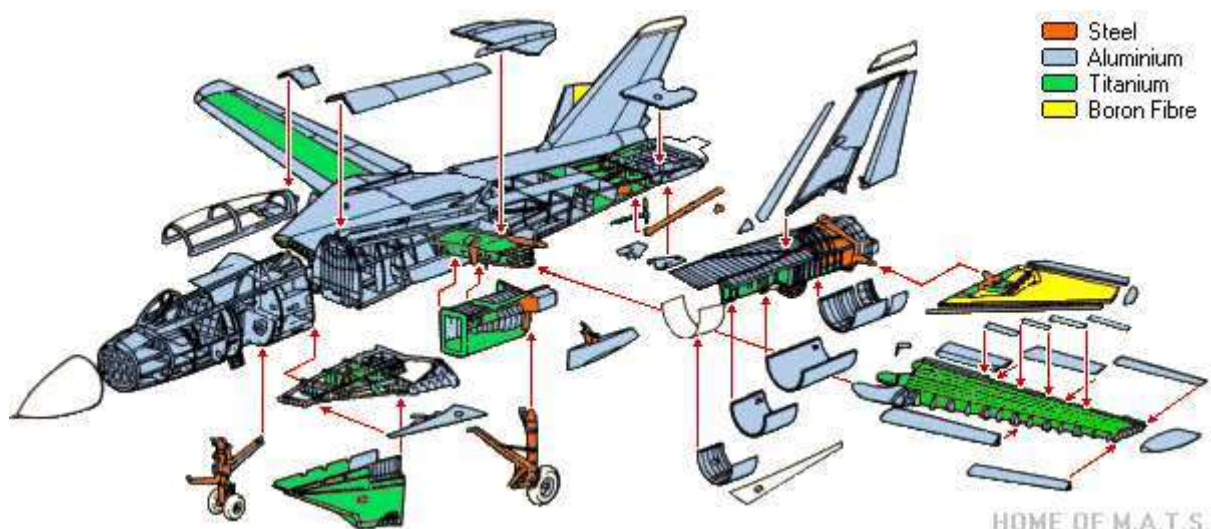
1 Caratteristiche dei materiali di impiego aeronautico

La produzione industriale dei mezzi da trasporto aereo richiede un elevato numero di materiali e prodotti in diversi, tra l'altro in continuo evoluzione. Tuttavia, come ogni settore della tecnologia delle costruzioni che si contraddistingue per uno o più materiali caratteristici, anche in campo aeronautico la caratteristica specifica, che devono possedere tutti i materiali idonei, è senza dubbio l'elevata capacità di resistere agli sforzi abbinata alla loro leggerezza.

In poche parole i materiali utilizzabili in campo aeronautico sono tutti quei materiali che presentano un elevato **rapporto resistenza meccanica/peso** (SWR: strenght to weight ratio) e che contemporaneamente garantiscano:

- OMOGENEITÀ (il materiale deve avere le medesime proprietà in ogni direzione di sollecitazione);
- RESISTENZA alla CORROSIONE;
- INFIAMMABILITÀ;
- RESISTENZA alla FATICA (il materiale quantomeno deve avere un comportamento a fatica noto e garantire una durata accettabile);
- REPERIBILITÀ sul mercato ad un ragionevole costo.

I materiali che soddisfano tutti questi requisiti e che attualmente vengono utilizzati nell'industria aeronautica sono le leghe leggere di alluminio, di magnesio, l'acciaio, le leghe di titanio ed i materiali compositi.



Per approfondire il concetto del rapporto resistenza meccanica/peso si consideri quanto segue: l'acciaio ha una massa volumica (densità) di $7,75 \text{ kg/dm}^3$ ed una resistenza meccanica a trazione indicativa di 1100 N/mm^2 ; le leghe di alluminio (allo stato ricotto) hanno, rispettivamente, una massa volumica di $2,7 \text{ kg/dm}^3$ e una resistenza di circa 440 N/mm^2 . Pertanto i rapporti resistenza/peso sono quasi uguali (163 per l'alluminio e 142 per l'acciaio), ma l'acciaio pesa circa 3 volte le leghe di alluminio e resiste 3 volte tanto. Questo significa che a parità di resistenza, una lamiera in acciaio sarebbe spessa $1/3$ di quella in lega di alluminio, e presenterebbe tutti i svantaggi che derivano dal lavorare con spessori così ridotti (si pensi alle lavorazioni di foratura, svasatura, etc...) con conseguenti probabili deformazioni. L'alternativa, a parità di spessore, è avere una struttura 3 volte più pesante, improponibile in campo aeronautico, laddove la leggerezza è un requisito indispensabile.

Pertanto, oggi, la maggior parte dei componenti strutturali di un velivolo è costruita con leghe di alluminio, in tal caso, densità e resistenza meccanica permettono di sostenere carichi significativi con un peso contenuto. Per avere un'idea della natura e della differente quantità dei materiali utilizzati in un recente velivolo da trasporto civile, nella tabella adiacente si riporta la suddivisione, in percentuale di peso, dei diversi materiali che compongono un Boeing B757 e dalla quale si evince che la parte del leone viene fatta dall'alluminio e le sue leghe.

MATERIALI costituenti un BOEING B 757	
Alluminio	78%
Acciaio	12%
Titanio	6%
Compositi	3%
Altri	1%



Premesso che ogni materiale si distingue da un'altro per le sue proprietà caratteristiche di seguito elencate:

- Proprietà fisiche (quali peso specifico/densità, dilatazione termica, temperatura di fusione, conducibilità termica e elettrica,...)
- Proprietà meccaniche (resistenza agli sforzi: trazione, compressione, taglio, flessione, torsione)
- Proprietà chimiche (resistenza alla corrosione)
- Proprietà tecnologiche (fusibilità, malleabilità, duttilità, temprabilità, saldabilità,...)

dal punto di vista delle applicazioni aeronautiche le proprietà più interessanti sono quelle meccaniche e quelle tecnologiche e pertanto nel dimensionamento pratico delle strutture aeronautiche ad esse faremo riferimento.

2.1 Gli acciai nelle costruzioni aeronautiche

L'acciaio è una lega ferro-carbonio contenete un'ampia varietà di metalli (Ni, Cr, Ti, ...) prodotta a partire dalla ghisa, le cui proprietà dipendono fondamentalmente dalla percentuale di carbonio presente che può al massimo raggiungere il 2%. In particolare con l'aumentare del tenore di carbonio in un acciaio aumentano la resistenza alla rottura e la durezza mentre diminuiscono la resistenza agli urti e la saldabilità. In generale l'acciaio è di certo il materiale di costruzione di più vasto impiego, e volendone sintetizzare i vantaggi e gli svantaggi derivanti dal suo utilizzo si ottiene la seguente tabella:

VANTAGGI	SVANTAGGI
• Economico e facilmente reperibile • Elevate caratteristiche meccaniche • Superficie dura e resistente all'usura • Utilizzabile alle alte temperature di esercizio • Buona saldabilità • Ampia scelta di proprietà meccaniche	• Basso rapporto resistenza/peso • Elevata massa volumica • Alcuni di essi sono estremamente sensibili alla corrosione

In particolare, poiché tutti gli acciai hanno un'elevata massa volumica, in campo aeronautico, si utilizzano laddove esistono limitazioni di spazio oppure sono richieste particolari doti di durezza e tenacità come ad esempio nei montanti alari, nelle gambe dei carrelli di atterraggio, nei castelli motori, nelle strutture a traliccio delle fusoliere oltre che nella bulloneria e nei cuscinetti.

Delle molteplici categorie di acciai esistenti, gli acciai attualmente impiegati nelle costruzioni aeronautiche sono gli **acciai speciali**, i soli ad avere un "interessante" rapporto tra resistenza e peso.

Essi contengono, oltre che il carbonio, molti altri componenti quali il nichel, cromo, manganese, molibdeno, ecc..., ognuno dei quali è presente in percentuali variabili ed ha una precisa influenza sulle caratteristiche meccaniche e tecnologiche dell'acciaio.

Ad esempio il molibdeno conferisce resistenza all'usura, il cromo agisce come elemento indurente e innalza il limite di elasticità, il nichel migliora la temprabilità e influisce favorevolmente sul carico di rottura, sulla durezza e sulla resistenza alla corrosione.

Un gruppo di acciai molto impiegato nelle costruzioni aeronautiche è quello degli acciai inossidabili, ottenuti aggiungendo una certa percentuale di alluminio che forma con il cromo un ossido che lo rende utilizzabile in qualsiasi ambiente senza incorrere nei pericoli della corrosione. I principali acciai inox sono quindi necessariamente al cromo oppure al nichel-cromo.

In campo motoristico sono invece molto utilizzati gli acciai resistenti alle alte temperature, si tratta di acciai a base di nichel-cromo--titanio-cobalto-molibdeno con basso tenore di ferro tra i quali il più importante è il

nimonic.

Tutti gli acciai vengono utilizzati dopo essere stati sottoposti a trattamenti termici per aumentarne le caratteristiche meccaniche e protettivi per preservarli dalla corrosione.

2.2. Trattamenti termici degli acciai

I trattamenti termici cui vengono sottoposti gli acciai consistono in una serie di operazioni aventi lo scopo di migliorare e modificare determinate proprietà modificandone la sua struttura. Le proprietà dei materiali che si possono modificare con i trattamenti termici sono: la durezza, resistenza, tenacità, lavorabilità, malleabilità.

Tutti i trattamenti sono caratterizzati da un ciclo termico, cioè dalla successione delle seguenti fasi: riscaldamento, permanenza a temperatura costante, raffreddamento. Durante il riscaldamento il metallo rimane sempre allo stato solido e non viene mai portato a fusione. La scelta di un particolare trattamento termico e delle modalità di esecuzione dipendono dal materiale e dalle proprietà che si vogliono conferire al materiale. Il riscaldamento avviene in forni appositi ad atmosfera controllata per evitare l'ossidazione (più rapida alle alte temperature) o in bagni di appositi sali portati a fusione.

Il successivo raffreddamento può essere rapido (eseguito in acqua o olio) o lento (in forno) per ottenere le caratteristiche richieste. I trattamenti termici di materiali ferrosi sono caratterizzati dal fatto che a particolari temperature (dette temperature critiche, rilevabili dai diagrammi di stato) avvengono particolari trasformazioni strutturali che vengono fissate -o impedito- variando opportunamente le temperature di riscaldamento e le velocità di raffreddamento.

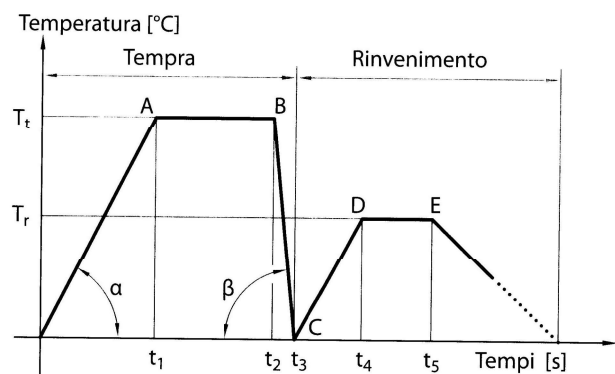
I trattamenti termici si suddividono in due categorie a seconda che modifichino o meno la composizione chimica del materiale:

TRATTAMENTI TERMICI	che NON modificano la composizione chimica del materiale	TEMPRA
		RINVENIMENTO
		BONIFICA
		RICOTTURA
		NORMALIZZAZIONE
	che modificano la composizione chimica del materiale	CEMENTAZIONE
		NITRURAZIONE
		CARBONITRURAZIONE

TEMPRA La tempra o tempera è il trattamento termico cui vengono sottoposti gli acciai allo scopo di aumentarne la loro durezza. Consiste nel riscaldare lentamente il materiale ad una temperatura superiore al punto critico, detta di tempra (circa 800° per gli acciai), e per un tempo tale che la stessa si raggiunga anche al centro del pezzo. Quindi si procede ad un repentino raffreddamento in acqua o in olio allo scopo di conferire al materiale la massima durezza (con l'acqua si ottiene una velocità di raffreddamento maggiore rispetto all'olio intorno ai 200°C al secondo). Con la tempra un acciaio assume una "struttura martensitica" a grana molto fine, durissima ma nel contempo fragile infatti, a causa delle diverse variazioni di volume cui è soggetta la massa nella fase di raffreddamento, si creano forti tensioni interne. Inoltre benché la tempra venga eseguita a regola d'arte, non è possibile evitare che i pezzi si deformino (in generale si ingrossano e si accorciano leggermente). Gli acciai con piccole quantità di carbonio (acciai dolci) non subiscono l'effetto della tempra.

RINVENIMENTO È il trattamento termico che segue la tempra allo scopo di eliminarne gli effetti dannosi riducendo la fragilità e le tensioni interne.

Consiste nel riscaldare il pezzo temperato, per un breve tempo, a una temperatura inferiore a quella di tempra (tra i 200 e i 650°C) e quindi raffreddarlo rapidamente in acqua o in olio. In tal modo si permette in parte la diffusione degli atomi di carbonio ottenendo alla fine un prodotto meno duro ma di sicuro più tenace.



BONIFICA È l'insieme dei trattamenti di tempra e rinvenimento, pertanto un acciaio si dice bonificato quando ha subito prima il trattamento termico di tempra e poi quello di rinvenimento.

RICOTTURA È il trattamento opposto alla tempra eseguito allo scopo di eliminare la durezza del pezzo e migliorare la lavorabilità del materiale rendendolo più dolce eliminando le tensioni interne. Il trattamento viene eseguito riscaldando il pezzo ad una temperatura superiore a quella di tempra (circa $850-900^{\circ}\text{C}$ per gli acciai), e quindi procedendo ad un lento ed uniforme raffreddamento (la velocità di raffreddamento è di circa 5°C al secondo) in genere in bagni di sabbia o ceneri calde.

La ricottura oltre lo scopo di conferire all'acciaio dolcezza, omogeneità, lavorabilità all'utensile e malleabilità distrugge gli effetti di trattamenti termici precedenti oppure gli effetti di lavorazioni plastiche (laminazione, trafilatura, stampaggio) che possono aver incrudito il materiale.

NORMALIZZAZIONE E' il trattamento eseguito allo scopo di distruggere gli effetti di altri trattamenti termici o lavorazioni meccaniche e predisporre il materiale per successive lavorazioni. Si esegue riscaldando il pezzo a temperatura di poco superiore a quella di ricottura, per un tempo sufficiente a riscaldare tutto il pezzo, una permanenza a tale temperatura e un successivo raffreddamento in aria calma.

Tra i trattamenti che comportano una modifica della composizione chimica del pezzo, almeno nella parte superficiale, i più significativi sono:

CEMENTAZIONE Consiste nel fare assorbire alle superfici acciaio che vengono esposte una certa quantità di carbonio allo scopo di aumentarne la durezza. Gli acciai che vengono sottoposti in genere a questo trattamento sono gli acciai extra-dolci (max 0,2 % di carbonio), quelli al nichel, al nichel-cromo. Ad esempio si sottopongono a cementazione pezzi che devono avere una grande durezza e resistenza all'usura come i denti delle ruote dentate o perni degli alberi a gomito dei motori.

NITRURAZIONE Consiste nel fare assorbire alle superfici acciaio che vengono esposte una certa quantità di azoto che combinandosi con il ferro forma sulla parte superficiale dei nitruri che conferiscono alla superficie del pezzo una grandissima durezza perfino superiore a quella ottenuta con la cementazione e successiva tempera. Ciò viene ottenuto immergendo il pezzo in un'atmosfera di gas ammoniacale (azoto e idrogeno) a una temperatura di circa 550°C. La nitrurazione non richiede la tempra del pezzo e necessitando di un riscaldamento molto minore di quella della cementazione, non altera la struttura dei pezzi deformandoli pochissimo.

CARBONITRURAZIONE E' l'azione combinata dei due trattamenti prima esposti e consiste nell'inserire nei reticoli atomi di carbonio e azoto.

2.3 Corrosione e trattamenti protettivi

I trattamenti protettivi ai quali si sottopongono i materiali metallici hanno il compito di proteggere la superficie esterna del pezzo dal fenomeno della corrosione. Si tratta di un fenomeno di natura fisico-chimica che comporta il deterioramento del materiale metallico a seguito all'ossidazione delle superfici esterne quando viene a contatto con l'ambiente esterno.

Tra le differenti forme di corrosione originate dalle diverse specie ossidanti (sali, acidi, inquinanti,...), la più significativa, dal punto di vista dei materiali di impiego aeronautico, è quella "atmosfera" originata

dall'ossigeno presente nell'aria quando l'umidità atmosferica si condensa sulla superficie del metallo.

Per arrestare la corrosione esistono diverse forme di protezione, del resto, data la varietà dei materiali metallici e le differenti condizioni ambientali nelle quali può avere origine la corrosione, non esiste un unico trattamento protettivo ma esistono differenti tecniche che si possono sostanzialmente distinguere in forme di protezione di tipo passivo e di tipo attivo. (cfr. la sottostante tabella riepilogativa)

TRATTAMENTI PROTETTIVI	di tipo PASSIVO	protezione mediante VERNICIATURA		
		protezione mediante RIVESTIMENTI METALLICI	IMMERSIONE in METALLI FUSI	ZINCATURA
			SPRUZZATURA di METALLI FUSI	
			ELETTROLISI	CROMATURA, NICHELATURA
			PLACCATURA	
	di tipo ATTIVO	protezione mediante TRATTAMENTI CHIMICI e ELETTROCHIMICI		

Nel primo caso la protezione serve ad isolare la superficie del metallo dall'ambiente esterno mediante il suo rivestimento (previo accurata pulizia della stessa) con ad esempio, un film di pittura protettiva o manti a base di polietilene o bitume (frequentemente usati come rivestimento esterno delle tubazioni in acciaio interrate).

Un'altra forma di trattamento di tipo passivo consiste nel rivestire, con differenti modalità, le superfici esterne del pezzo di zinco, cromo, cadmio, nichel,...

Ad esempio nella zincatura, usata per proteggere il ferro, si immerge il metallo, in un bagno fuso di zinco. In tal caso, poiché lo zinco è più riducente del ferro, anche se una parte della superficie ferrosa rimane scoperta, l'ossidazione procede sullo zinco (con formazione di ruggine bianca costituita prevalentemente da idrossido di zinco e in minima parte da ossido e carbonato) e il ferro rimane protetto fino a quando non è stato consumato tutto lo zinco. In alternativa all'immersione si può procedere mediante spruzzatura con apposite pistole dei metalli fusi sulle superfici da proteggere in modo da applicare il trattamento protettivo

anche a strutture fisse o di forma complicata.

Quando si vuole proteggere un manufatto di ferro utilizzando metalli più nobili, quali il cromo o il nichel, (cromatura o nichelatura) il rivestimento della superficie del pezzo avviene per lo più per via elettrolitica collegando la parte da ricoprire al polo negativo di una cella elettrolitica contenente una soluzione acquosa del metallo coprente. Un ultimo trattamento di tipo passivo è il rivestimento per placcatura consistente nell'applicare attraverso processi meccanici un sottile strato di un opportuno metallo o lega sulla superficie del metallo da coprire. E' il sistema che viene adottato per le leghe leggere.

Le protezioni di tipo attive sono chiamate protezioni catodiche e sono utilizzate per eliminare i fenomeni di corrosione dei manufatti di ferro interrati. Si possono distinguere due tipologie di protezioni catodiche:

- *a corrente impressa*: consiste nell'applicare dall'esterno una fem contraria, ossia collegare il manufatto al polo negativo di un generatore esterno il cui polo positivo è a sua volta collegato ad un elettrodo inerte (esempio grafite) interrato in prossimità del manufatto. L'umidità del terreno funge da elettrolita.
- *ad anodo sacrificale o ad accoppiamento galvanico*: consiste nel collegare direttamente il manufatto in ferro ad un elettrodo interrato costituito da un metallo meno nobile (più riducente) del ferro stesso, quali lo zinco o il magnesio. Si viene a creare una cella galvanica in cui il ferro funge da catodo e l'elettrodo da anodo che di conseguenza si corrode preservando così l'integrità del manufatto in ferro fino a quando l'anodo non si consuma completamente.

3.1 Le leghe leggere di Alluminio

L'alluminio è un elemento molto diffuso in natura che si ricava, quasi esclusivamente da un suo ossido, la bauxite Al_2O_3 , attraverso due fasi successive: la prima di produzione di allumina pura per via chimica ed elettrolisi, e quella successiva di elettrolisi dell'allumina prodotta in precedenza.

L'**alluminio puro** ha scarse caratteristiche meccaniche e si ossida con estrema facilità, con la formazione di una pellicola compatta di ossido. L'ossido è altamente stabile e non attacca il metallo sottostante, agendo come passivante. L'alluminio presenta, tuttavia, interessanti caratteristiche tecnologiche (malleabilità, duttilità, imbutibilità) che si concretizzano con una notevole facilità di lavorazione plastica a freddo e a caldo.

Poiché tali caratteristiche si conservano anche se aggiungiamo elementi di lega, mentre le limitate caratteristiche meccaniche dell'alluminio puro, vengono notevolmente incrementate dall'aggiunta degli elementi di lega, si capisce il perché l'alluminio non è mai utilizzato allo stato puro ma sempre in forma di **leghe leggere di alluminio**.

I principali leganti dell'alluminio sono: rame, silicio, manganese, magnesio, zinco, che possono essere aggiunti singolarmente per formare leghe binarie ma più spesso vengono aggiunti in "gruppo" per formare leghe più complesse.

Volendo, come fatto in precedenza per l'acciaio, ricapitolare le caratteristiche principali dell'alluminio e delle sue leghe, distinte in vantaggi e svantaggi dal punto di vista delle costruzioni aeronautiche avremo:

VANTAGGI	SVANTAGGI
• Elevato rapporto resistenza/peso • Ampia scelta di leghe, per soddisfare un ampio range di usi; • Disponibile in svariate forme standard (fogli, piastre, lastre, profilati, tubi,....) • Facilità di lavorazione	• Le leghe di alluminio sono sensibili alla corrosione • Bassa resistenza alle alte temperature • Cattivo comportamento a fatica

Dal punto di vista dei trattamenti termici le leghe di alluminio si possono classificare in funzione all'attitudine al trattamento di bonifica, e pertanto avremo leghe bonificabili e leghe non bonificabili. Nelle prime, con il trattamento termico, migliorano notevolmente le caratteristiche meccaniche, nelle seconde, quest'ultime rimangono inalterate. Nel caso di leghe non bonificabili si possono avere aumenti delle caratteristiche meccaniche tramite **incrudimento**. Per quanto riguarda i trattamenti protettivi i più utilizzati sono l'anodizzazione (ossidazione anodica), la cromatazione e la placcatura.

L'anodizzazione delle leghe di alluminio, in particolare, consiste nel ricoprire il materiale con una sottile pellicola di ossido naturale per impedire il propagarsi del fenomeno di ossidazione.

3.2 Classificazione delle leghe leggere di Alluminio

Una prima classificazione è possibile in funzione del legante principale; avremo, perciò i seguenti gruppi:

- **Leghe Al-Cu** (e derivate: Al-Cu-Si, Al-Cu-Mg, etc.): caratterizzate da buona resistenza meccanica, mantenuta fino a circa 100 °C, e bonificabile.
- **Leghe Al-Zn** (e derivate: Al-Zn-Mg-Cu): caratterizzate da buona resistenza a freddo e lavorabilità, bonificabile.
- **Leghe Al-Si** (e derivate): caratterizzate da buona colabilità.
- **Leghe Al-Mg** (e derivate): caratterizzate da buona resistenza alla corrosione e attitudine alle lavorazioni plastiche e all'utensile.

Per le sole leghe da **lavorazione plastica** si fa spesso riferimento alla classificazione dell'Aluminum Association (A.A.); è un sistema molto diffuso, soprattutto nell'ambito delle costruzioni aeronautiche. Questo sistema di designazione prevede l'individuazione della lega con un **numero di 4 cifre**, dove la **1a cifra identifica il gruppo della lega**, come da prospetto seguente:

- 1** Caratterizza l'alluminio tecnico ($Al_{min}=99,5\%$)
- 2** Caratterizza le leghe del gruppo Al-Cu (Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si)
- 3** Caratterizza le leghe del gruppo Al-Mn (Al-Mn, Al-Mn-Mg, Al-Mn-Si)
- 4.** Caratterizza le leghe del gruppo **Al-Si**
- 5.** Caratterizza le leghe del gruppo Al-Mg
- 6.** Caratterizza le leghe del gruppo Al-Mg₂Si
- 7.** Caratterizza le leghe del gruppo Al-MgZn₂

Dei vari gruppi sopracitati, nel campo delle costruzioni aeronautiche, per la realizzazione di molte parti strutturali del velivolo, come ad esempio centine, longheroni, rivestimento alare, ordinate, correnti e rivestimento della fusoliera, si fa uso principalmente di leghe **Al-Cu** (gruppo 2) e **Al-Zn (gruppo 7)** e relative leghe derivate. In particolare si segnalano :

- tra le leghe alligate al Cu , **la lega 2024 denominata Avional 24** utilizzata nelle applicazioni dove sono prevalenti carichi di trazione e/o fatica come nel caso della pannellatura di fusoliera (rivestimento della cabina) o la pannellatura inferiore dell'ala (ventre).
- tra le leghe alligate allo Zn, **la lega 7075 denominata Ergal 55**, utilizzata nelle zone dove prevalgono carichi di compressione come nel caso della pannellatura superiore dell'ala o delle fusoliere non pressurizzate.

4.1 Il Titanio e le sue leghe

Il titanio è un metallo di aspetto simile all'acciaio inossidabile, con un'elevata temperatura di fusione (circa 1725°C) ed un elevato rapporto resistenza meccanica/peso; le difficoltà di produzione e di lavorazione ne hanno limitato l'uso che è diventato più comune solo dalla seconda metà degli anni sessanta e poi in continuo progresso soprattutto in campo militare. Si pensi che sul Boeing 727, progetto dei primi



anni '60, meno del 2% in peso della struttura era in titanio; sul Boeing 747, fine anni '60, il peso delle parti strutturali in titanio era già salito al 10%, con il velivolo militare F14 la percentuale sale al 25%, per giungere verso la fine degli anni 70 al velivolo militare supersonico in foto, il Lockheed SR-71, che raggiungendo Mach 3,35 era interamente rivestito in titanio.

Infatti solo nei primi anni cinquanta si è resa disponibile la tecnologia per fondere il titanio e parecchi anni dopo è stata sviluppata una lega trattabile termicamente. Anche in questo caso sono le leghe, e non il titanio puro, ad avere le caratteristiche più interessanti, tali da giustificare l'impiego. Il ridotto peso specifico, la buona resistenza meccanica anche a temperature elevate, l'ottima resistenza alla corrosione, ne fanno un materiale eccellente per impieghi aeronautici: le uniche limitazioni sono date dal costo e da una certa difficoltà di lavorazione. Ove vi siano particolari fortemente sollecitati, soprattutto se in ambiente corrosivo o con alte temperature, le leghe di titanio sono la scelta migliore.

Le leghe di titanio presentano, inoltre, alcune proprietà molto interessanti quali la **superplasticità** e l'attitudine alla **saldatura per diffusione** (diffusion bonding). La prima consente, alla temperatura di 850-900°C di realizzare pezzi di notevole allungamento senza difetti o inneschi di rotture, la seconda permette di realizzare la "saldatura perfetta" di due lamiere per pressione, poiché non crea zone termicamente alterate e che presentano, inoltre, caratteristiche identiche a quelle del materiale di partenza.

Infine, le leghe di titanio, restano l'unica soluzione nel caso del volo supersonico, a causa delle elevate temperature che si raggiungono durante il volo ad alto Mach (infatti pur trovandosi a elevata altitudine e quindi ad una bassa densità atmosferica, si possono raggiungere temperature superiori ai 300 °C per via della rapida compressione subita dall'aria che lambisce l'aereo).



Mentre le leghe di alluminio sono utilizzabili sino a 180°C, Leghe di titanio utilizzabili sino a 600°C. Lo stesso Concorde, primo ed unico velivolo di linea supersonico, era limitato a Mach 2.2 a causa dell'utilizzo delle leghe di alluminio.

5.1. Leghe di MAGNESIO (ultraleggere)

Tra i metalli impiegati industrialmente il magnesio è quello più basso peso specifico; legato con opportuni elementi (Zn, Al, Mn) vengono raggiunte buone resistenze meccaniche senza aumentare il peso specifico ottenendo in tale modo le leghe denominate **ultraleggere**.

Il favorevole rapporto resistenza meccanica/peso specifico ha come controparte problemi di lavorazione e di dimensione (per parti sollecitate), tanto da dover limitare l'uso delle leghe di magnesio a parti non eccessivamente sollecitate anche se di notevole importanza (carter motori, pannelli di rivestimento, cerchioni di ruote).

Le leghe di magnesio possiedono buone caratteristiche di colata, tanto da porsi in diretto confronto con le fusioni in alluminio; circa il 95% (in peso) delle leghe di magnesio impiegate nel settore aeronautico è costituito da fusioni. Tuttavia le leghe di magnesio sono particolarmente sensibili all'ossidazione e richiedono particolari precauzioni (atmosfera controllata di SO₂) durante i trattamenti termici di ricottura, tempra strutturale ed invecchiamento. Inoltre presentano, come il magnesio stesso, alcuni **pericoli d'incendio**, particolarmente importanti se si tratta di polveri o trucioli.

Queste motivazioni ne limitano l'utilizzo nel settore aeronautico commerciale, in particolare agli elicotteri o nei velivoli a decollo verticale, mentre il magnesio e le sue leghe trovano la massima applicazione nel settore missilistico, nel quale questi materiali possono arrivare anche a costituire il 90% della struttura. Tra le leghe ultraleggere impiegate nelle costruzioni aeronautiche si ricorda l' "electron".