

Capitolo 2

Elementi di metallurgia delle leghe di alluminio

2.1. Premessa

Il comportamento meccanico e tecnologico di un materiale metallico è il risultato delle sue caratteristiche microstrutturali (fasi presenti, loro quantità, dimensioni, morfologia e distribuzione) e degli effetti indotti su queste dai processi produttivi e di trasformazione. Le interazioni tra microstruttura, processo e comportamento finale sono certamente complesse, e una loro trattazione completa esula certamente dagli scopi di questo libro; è comunque opportuno richiamare sinteticamente alcuni concetti metallurgici di base, proprio per facilitare la comprensione dei meccanismi microstrutturali all'origine dei comportamenti delle leghe di alluminio e per avere quindi nozioni adeguate per un loro corretto utilizzo.

Nei paragrafi che seguono vengono pertanto illustrati:

- la struttura cristallina e il legame che unisce atomi metallici allo stato solido;
- le proprietà metallurgiche di una soluzione solida e gli effetti indotti dal limite di solubilità;
- i fenomeni microstrutturali che spiegano i meccanismi di rafforzamento attivi nelle leghe ed il loro comportamento meccanico;
- l'evoluzione del processo di solidificazione di una lega, che spesso risulta decisivo nel determinarne le caratteristiche microstrutturali.

Per svariati aspetti inerenti agli argomenti svolti, sui quali si sono effettuate notevoli operazioni di semplificazione, si rimanda ovviamente ai riferimenti bibliografici. Altri punti invece, come il rafforzamento per precipitazione di fase, sono dettagliatamente approfonditi nei capitoli successivi a questa trattazione introduttiva.

2.2. La struttura cristallina

L'alluminio è un materiale metallico, che, allo stato puro, presenta le caratteristiche fisiche indicate nella tabella 1. Allo stato solido, gli atomi di alluminio sono disposti secondo uno schema ordinato (reticolo cristallino), che si ripete periodicamente nello spazio. L'unità di "base" di tale schema prende il nome di cella cristallina unitaria, mentre l'aggregato formato dalle celle viene denominato cristallo o grano cristallino. I differenti atomi che formano il grano cristallino sono tenuti insieme dal legame metallico, come schematizzato nella figura 1.

In sostanza, un materiale metallico (e quindi anche l'alluminio) allo stato solido può essere rappre-

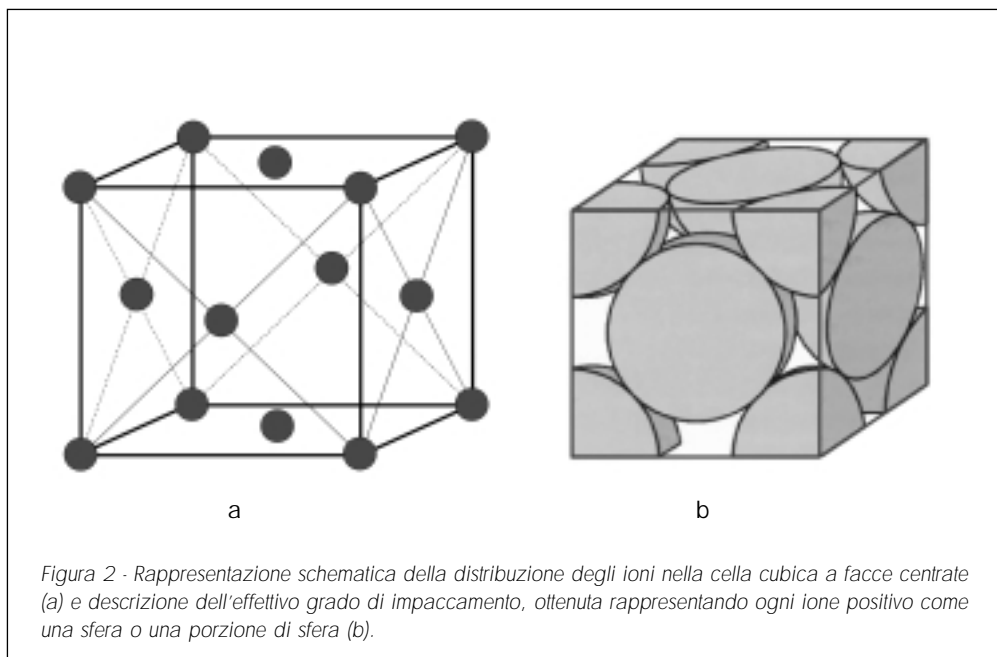
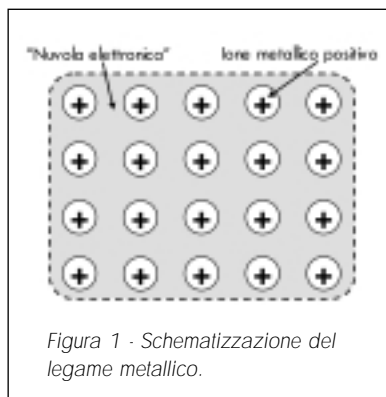
sentato come un insieme di ioni metallici positivi, distribuiti secondo la disposizione ordinata data dal reticolo cristallino, circondati dalla cosiddetta "nuvola elettronica", costituita dagli elettroni degli strati atomici esterni che vengono condivisi dall'intera struttura. La mutua attrazione tra gli ioni positivi e la nuvola elettronica fornisce il legame metallico. Gli elettroni presenti nella nuvola hanno una certa libertà di movimento e quindi, per effetto dell'applicazione di una opportuna tensione, possono fluire piuttosto facilmente, determinando così la buona conducibilità elettrica del metallo.

Il reticolo cristallino dell'alluminio è di tipo cubico a facce centrate (CFC). Lo schema della cella (nel quale per semplicità di visualizzazione gli ioni metallici sono più "distanziati" rispetto alla realtà) è riportato nella figura 2a, mentre la figura 2b illustra con maggior realismo l'elevato grado di impaccamento degli ioni metallici caratteristico di questa cella.

La configurazione della cella cristallina e, conseguentemente, dei grani rappresenta una schematizzazione

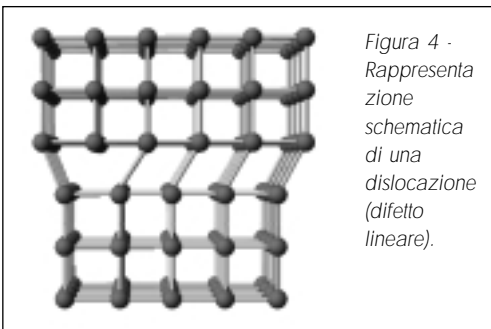
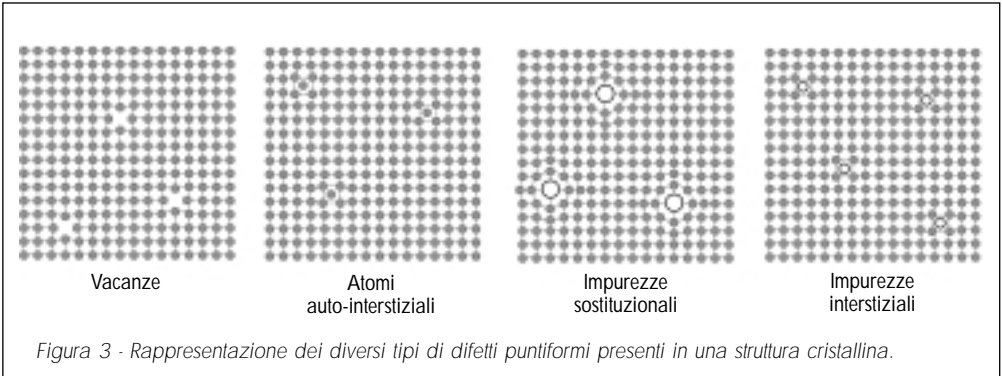
Tabella 1 • Principali caratteristiche fisiche dell'alluminio puro

Numero atomico	13
Massa atomica	26,9815 kg/kmol
Struttura cristallina	Cubica a facce centrate
Parametro reticolare	4,04 Å
Densità a 20 °C	2,70 kg/dm ³
Temperatura di fusione	659,9 °C
Temperatura di ebollizione	2.270 °C
Calore specifico	93,9 kJ/(kg K)
Calore latente di fusione	394,5 kJ/kg



“teorica”, che deve essere confrontata con la situazione reale. Un qualsiasi aggregato cristallino, pur avendo il riferimento ideale della cella unitaria, presenta infatti dei difetti. Tali difetti si possono classificare in termini di:

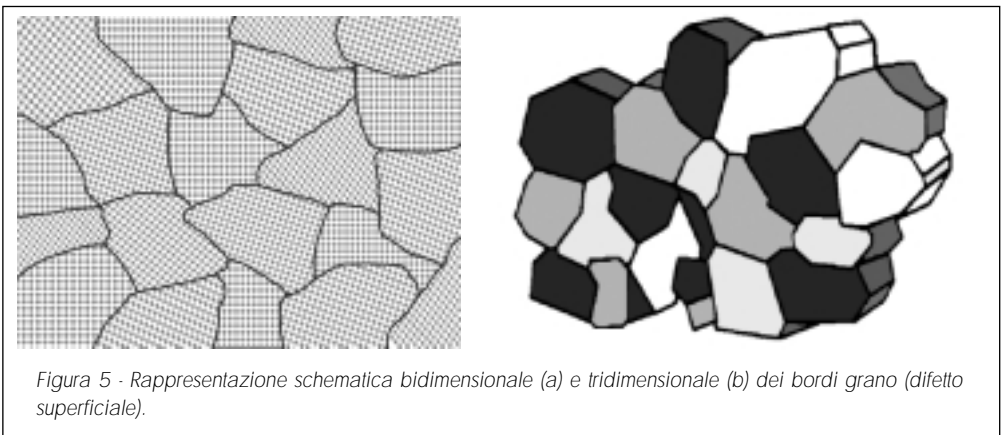
- difetti puntiformi (figura 3): vacanze (cioè presenza di “vuoti” nella struttura cristallina); atomi auto-interstiziali (cioè atomi collocati in posizione anomala rispetto alla configurazione teorica); atomi di impurezze (cioè di una seconda specie atomica) che “sostituiscono” l’atomo principale in qualcuna delle sue posizioni caratteristiche - impurezze sostituzionali - o che si inseriscono



negli interstizi presenti tra gli atomi principali - impurezze interstiziali;

- difetti lineari: dislocazioni che rappresentano, rispetto alla configurazione teorica, l’assenza di una fila di atomi e che sono responsabili dei fenomeni di deformazione plastica (figura 4);

- difetti superficiali, quali i bordi di grano, cioè la superficie di separazione tra due aggregati cristallini adiacenti (figura 5), e i difetti di impilaggio (che si generano cioè durante la costituzione della struttura solida).



La presenza delle varie tipologie di difetti menzionate gioca un ruolo fondamentale nel determinare il comportamento fisico, meccanico, tecnologico di un metallo e di una lega.

2.3. La soluzione solida

Nelle applicazioni reali, l'impiego di alluminio puro è piuttosto raro, e in ogni caso si preferisce la denominazione di "alluminio commercialmente puro" (Al_{CP}), data la presenza di limitati quantitativi di silicio e ferro come principali impurezze. Al di là di questo, va invece detto che quasi sempre si fa uso di leghe, che presentano quindi l'aggiunta intenzionale di elementi addizionali, allo scopo di migliorare il comportamento del materiale.

Il punto di partenza per introdurre il concetto di lega metallica è il difetto puntiforme. Nel momento in cui all'alluminio viene aggiunto un secondo elemento, questo inizia a comportarsi come impurezza sostituzionale o interstiziale. In realtà, per motivi di carattere dimensionale, tutti i principali alliganti impiegati nelle leghe di alluminio sono da considerarsi impurezze sostituzionali. Un elemento sostituzionale induce nella cella dell'alluminio una "perturbazione dimensionale". Infatti, per motivi legati alle dimensioni atomiche dell'alluminio e dell'elemento sostituzionale in questione, la cella subisce una deformazione (si veda la schematizzazione riportata nella figura 3). Tale deformazione, entro certi limiti, può essere "assorbita" dalle celle dell'alluminio adiacenti a quella interessata dall'elemento sostituzionale. In questo caso, si può ritenere che l'elemento aggiunto risulti in qualche modo "sciolto" all'interno dell'aggregato cristallino dell'alluminio. In termini più appropriati, si può dire che l'elemento aggiunto si trova in soluzione solida all'interno dell'alluminio. La soluzione solida formata costituisce, a tutti gli effetti, quella che, in termini metallurgici, viene definita come una fase.

Un atomo in soluzione solida (o "soluto"), pur se "accettato" dal solvente (cioè l'alluminio), ne va comunque a distorcere e perturbare la cella. L'entità della distorsione è influenzata essenzialmente:

- dalle dimensioni atomiche del soluto e del solvente (quanto più queste sono confrontabili, tanto minore sarà la distorsione);
- dalla temperatura (al crescere di quest'ultima, la dilatazione del materiale e la maggior mobilità degli atomi di solvente rendono meno critica la presenza del soluto).

Ciò premesso, è chiaro che al crescere del numero di atomi di soluto aggiunti, si vengono a determinare distorsioni e tensionamenti eccessivi nella cella del solvente, che non possono più essere accettabili in termini energetici (in base ai principi della termodinamica, ogni materiale tende ad assumere quella configurazione che rende minimo il contenuto di energia). La quantità massima di soluto "accettabile" da parte del solvente viene detta limite di solubilità, e dipende evidentemente dalla temperatura e dalla coppia solvente-soluto presa in considerazione.

Finché il soluto è presente in quantità inferiore al limite di solubilità caratteristico della temperatura e del sistema considerato, nel sistema è presente una sola fase, cioè la soluzione solida, che convenzionalmente viene definita come fase α (ad esempio, nelle leghe Al-Si da fonderia, si parla di fase α , ricca di alluminio e con una certa quantità di silicio disciolta in essa).

Qualora il soluto sia presente in eccesso rispetto al limite di solubilità, la configurazione a energia minima è costituita da due fasi: la fase α (con il soluto presente in quantità coincidente con il limite di solubilità) e una seconda fase, costituita solitamente da un composto intermetallico o da un'altra soluzione solida, formata dall'alluminio e dall'elemento aggiunto (con quest'ultimo presente in quantità rilevante ed evidentemente superiore rispetto al limite di solubilità).

Una visione generale dei concetti sopra esposti si ottiene introducendo un diagramma composizione-temperatura nel quale viene indicato, alle varie temperature, il valore del limite di solu-

Tabella 2 • Dimensioni atomiche e caratteristiche di solubilità dei principali elementi presenti nelle leghe di alluminio

Elemento	Dimensioni atomiche (nm)	Solubilità massima (% in peso)	alla temperatura (°C)
Rame	0,26	5,65	548
Ferro	0,25	0,05	655
Litio	0,30	4,20	600
Magnesio	0,32	17,40	450
Manganese	0,25	1,82	658
Silicio	0,23	1,65	577
Zinco	0,28	70,00	443

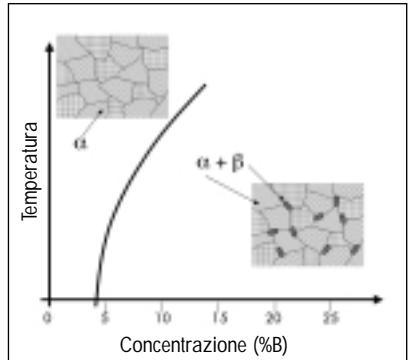


Figura 6 - Curva di solubilità in un diagramma di stato e individuazione delle regioni monofasica e bifasica.

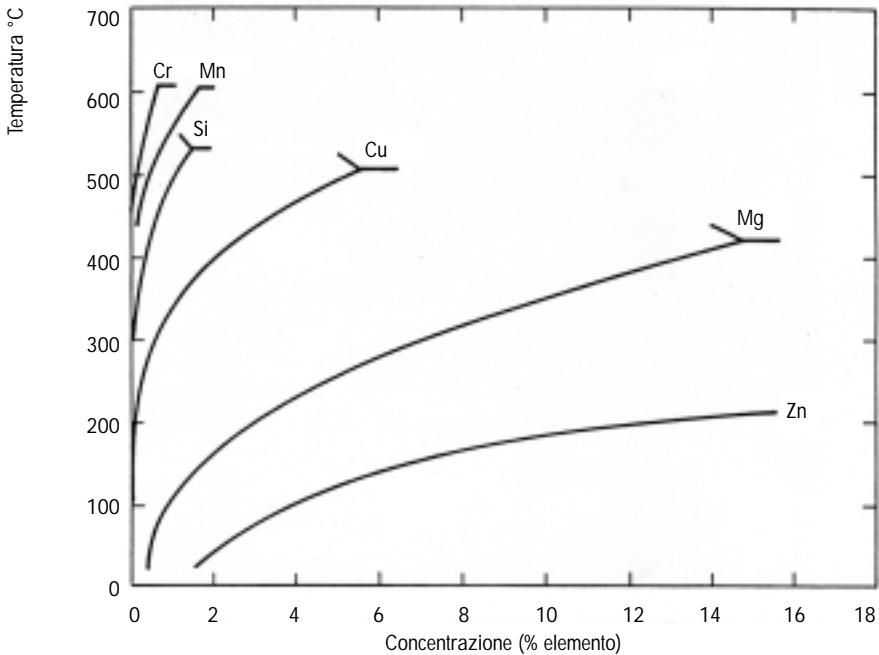


Figura 7 - Valori di solubilità dei principali alliganti dell'alluminio. (fonte: Metals Handbook)

bilità (figura 6). In questo tipo di diagramma (che viene denominato diagramma di stato), la curva di solubilità permette di individuare due regioni: quella monofasica (è presente un'unica fase costituita dalla soluzione solida α) e quella bifasica (oltre ad α , è presente una seconda fase, costituita da un intermetallico o da una soluzione solida differente).

Nella figura 7 e nella tabella 2 si riportano gli andamenti e i valori caratteristici delle solubilità dei principali alliganti impiegati per l'alluminio.

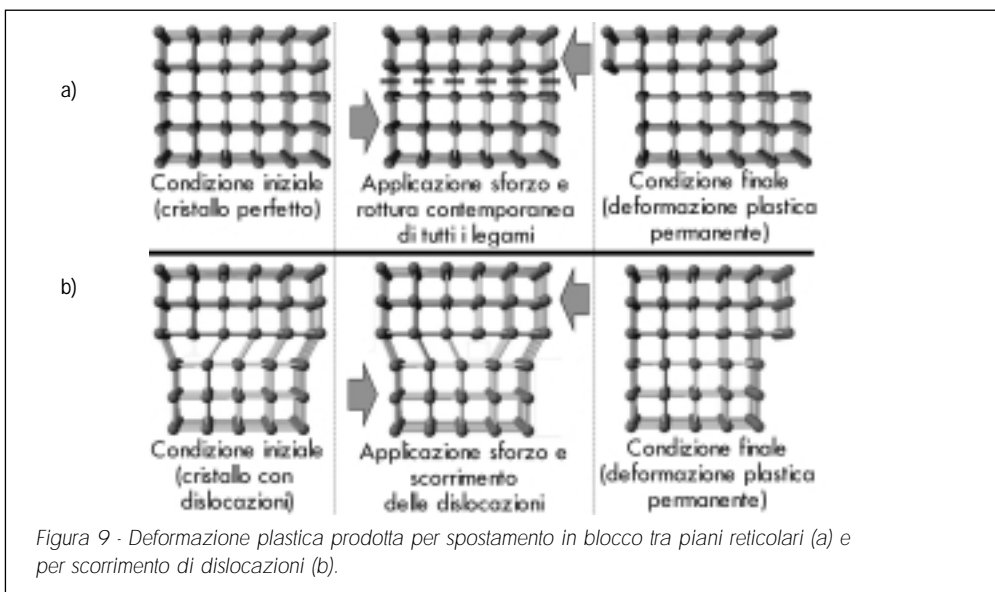
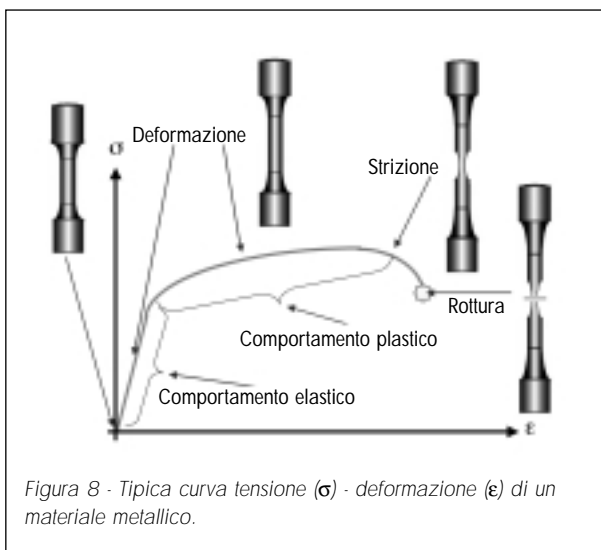
2.4. Microstruttura e comportamento meccanico

Un materiale metallico, sottoposto a una sollecitazione meccanica, tende progressivamente a deformarsi per poi rompersi (figura 8). La deformazione è inizialmente di tipo elastico (cioè perfettamente recuperabile), e risulta linearmente proporzionale alla tensione applicata. Il coefficiente di proporzionalità viene definito modulo elastico o modulo di Young.

Una volta raggiunto e superato il carico corrispondente al limite del comportamento elastico (convenzionalmente noto come limite di proporzionalità), il materiale inizia a deformarsi plasticamente, cioè in maniera permanente.

La deformazione plastica in un materiale metallico avviene per effetto dello scorrimento di un piano reticolare rispetto a quello adiacente, determinato dall'applicazione di una adeguata forza esterna. Il piano reticolare su cui specificamente avviene lo scorrimento dipende essenzialmente dal tipo di cella del materiale in questione.

Lo scorrimento non avviene, come potrebbe essere immaginato, mediante lo spostamento di un "blocco" di atomi rispetto ad un altro (figura 9a). È stato dimostrato che l'energia necessaria sarebbe troppo elevata. Lo scorrimento tra i piani reticolari avviene grazie



alla presenza delle dislocazioni, come schematizzato nella figura 9b. Senza entrare nel dettaglio del fenomeno, che richiederebbe rilevanti approfondimenti di metallurgia fisica, si può comunque dire che l'applicazione di uno sforzo macroscopico esterno fornisce, a livello locale, l'energia necessaria a fare scorrere le dislocazioni presenti nel materiale. E' pertanto lo scorrimento delle dislocazioni che determina l'insorgere nel materiale della deformazione plastica. In sostanza, una deformazione plastica macroscopica è sempre il risultato della combinazione del movimento di un numero elevatissimo di dislocazioni.

Ciò premesso, la conseguenza pratica più evidente è che, in un materiale metallico, quanto più è agevolato il movimento delle dislocazioni, tanto più facilmente avviene la deformazione plastica ed evidentemente tanto più limitata risulta essere la resistenza meccanica. In altri termini, la "strategia" che si deve adottare per "rafforzare" un metallo o una lega è quella di introdurre ostacoli microstrutturali al movimento delle dislocazioni. La presenza di tali ostacoli rende necessario incrementare lo sforzo applicato per far scorrere localmente la dislocazione e deformare macroscopicamente il materiale. Pur senza entrare nei dettagli sviluppati dalla metallurgia meccanica, si può comunque evidenziare come esistano alcuni ben noti sistemi di rafforzamento di un materiale metallico, basati proprio sulla capacità di introdurre ostacoli al movimento delle dislocazioni.

Nel rafforzamento per soluzione solida si sfrutta la distorsione indotta nel reticolo da un elemento sostituzionale o interstiziale (come evidenziato nella figura 3). Tale distorsione contribuisce a rendere più difficoltoso lo scorrimento della dislocazione, che avverrà soltanto per effetto di un incremento nello sforzo applicato.

Nel rafforzamento per precipitazione, l'ostacolo al moto delle dislocazioni è costituito dalla precipitazione di una seconda fase, ottenuta sfruttando la variazione della solubilità con la temperatura (il Capitolo 4 presenta in dettaglio i principi metallurgici e le modalità esecutive dell'operazione). La seconda fase formata costituisce un ostacolo realmente efficace se è coerente (cioè se mantiene la continuità) con la fase principale; l'effetto è tanto più significativo quanto più sono limitate le dimensioni dei precipitati della seconda fase.

Nel rafforzamento per incrudimento (cioè per deformazione a freddo) intervengono due aspetti: i) in base a differenti meccanismi, il moto delle dislocazioni tende a generarne di nuove; ii) le dislocazioni sono sottoposte a vincoli geometrici e a fattori attrattivi o repulsivi che, in ultima analisi, tendono ad "ancorarle" le une alle altre.

In definitiva, la deformazione a freddo aumenta il numero delle dislocazioni e, nel contempo, ne favorisce il reciproco bloccaggio: un loro ulteriore movimento avviene soltanto incrementando lo sforzo applicato.

Tabella 3 • Meccanismi di rafforzamento attivi nelle principali leghe di alluminio

Lega	Soluzione solida	Incrudimento	Precipitazione
Al cp	NA	X	NA
Al-Cu	X	*	X
Al-Mn	X	X	NA
Al-Mg	X	X	NA
Al-Si	X	X	NA
Al-Mg-Si	X	*	X
Al-Zn	X	*	X

(X = meccanismo tipicamente attivo; NA = meccanismo non attivo; * = meccanismo potenzialmente attivo, ma in realtà non sfruttato perché "annullato" dal trattamento termico che produce la precipitazione).