

# MECCANISMI PER AUMENTARE LA RESISTENZA

## Introduzione

Abbiamo dunque capito che la capacità di un materiale di deformarsi plasticamente dipende dalla capacità di movimento delle dislocazioni. Dal momento che la durezza e lo sforzo sono correlati alla facilità con cui si può verificare la deformazione plastica, riducendo la mobilità delle dislocazioni si può aumentare la resistenza meccanica: limitando dunque o ostacolando il movimento delle dislocazioni si rende un materiale più duro e resistente. Esistono diversi modi per poter raggiungere questo scopo:

1. Incrudimento [deformazione plastica]
2. Bordo di grano
3. Atomi in soluzione solida [inserimento di un nuovo elemento nel reticolo cristallino]
4. Particelle deformabili di una seconda
5. Particelle indeformabili di una seconda fase

## Incrudimento

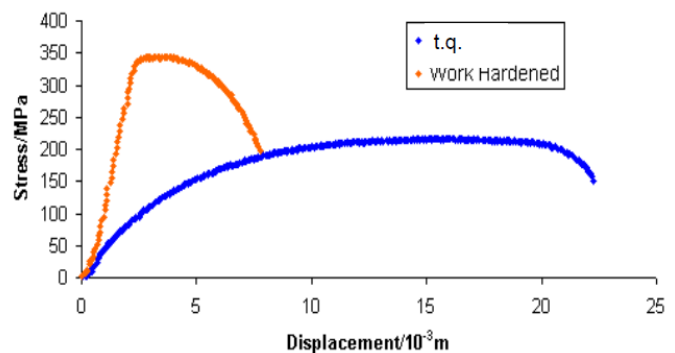
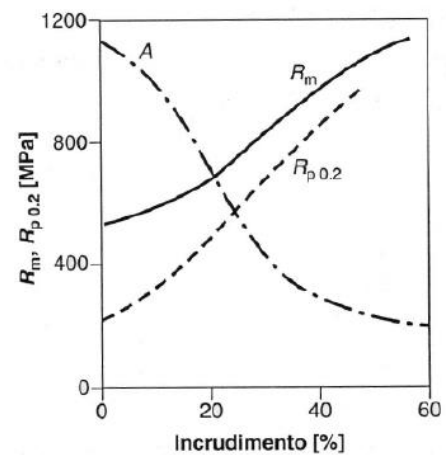
L'incrudimento è il fenomeno per cui un metallo duttile diviene più duro e più resistente quando viene deformato plasticamente. Esistono relazioni matematiche che descrivono tale fenomeno. Durante la deformazione plastica infatti la densità di dislocazioni aumenta e la distanza media tra dislocazioni adiacenti diminuisce e, poiché l'interazione tra le dislocazioni è mediamente di tipo repulsivo, la mobilità delle dislocazioni viene limitata e quindi il metallo diventa più duro e resistente. Un materiale a riposo presenta infatti circa  $10^6$  dislocazioni per  $\text{cm}^2$  mentre una volta deformato contiene circa  $10^{11}$  dislocazioni: a un massimo numero di dislocazioni corrisponde un allungamento percentuale che decresce in maniera significativa mentre l' $R_m$  aumenta drasticamente, al contrario se siamo al minimo numero di dislocazioni abbiamo un allungamento percentuale molto alto e un  $R_m$  e  $R_{p0.2}$  molto basso.

**Esempio:** **Rame ricotto**, cioè il rame vicino allo stato di equilibrio ha il livello minimo di dislocazioni e dunque è molto duttile. Nel momento in cui verrà sottoposto alla prova di trazione l'ultima porzione della frattura sarà inclinata di circa  $45^\circ$  a causa della struttura cubica a facce centrate del rame dunque la frattura sarà del tipo coppa – cono.

La stessa frattura la si otterrà sottoponendo il **rame incrudito** alla prova di trazione. Il rame incrudito è moderatamente duttile in quanto, essendo stato deformato plasticamente, contiene il maggior numero di dislocazioni possibili. È possibile dal rame incrudito ritornare al rame ricotto semplicemente fornendo calore: le dislocazioni diminuiscono perché fornendo calore possono saltare di piano e quindi incontrare altre dislocazioni; in questo modo può avvenire un annullamento delle dislocazioni stesse oppure si possono creare vacanze, etc. Questo processo prende il nome di processo di ricottura: viene diminuito  $R_m$  e aumentato l'allungamento percentuale.

## Soluzioni solide

È una tecnica che consiste nell'alligare il materiale con atomi di impurezza in modo da formare soluzioni solide interstiziali o sostituzionali. All'interno di un reticolo vengono quindi inseriti atomi in posizione interstiziale: l'atomo occupa delle posizioni reticolari possibili sfruttando i difetti di punto del materiale stesso. Affinché però un atomo possa occupare una posizione nel



reticolo cristallino è necessario soddisfare una condizione specifica: il raggio atomico deve avere dimensione  $\pm 15\%$ , solo in questo caso si possono formare soluzioni solide sostituzionali.

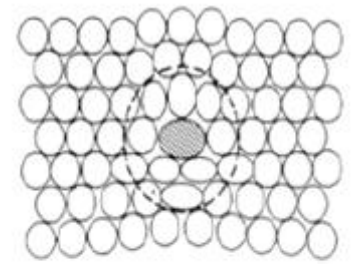
I metalli di elevata purezza sono quasi sempre più teneri e meno resistenti delle leghe formate dallo stesso metallo. Le leghe sono più resistenti dei metalli puri perché in genere gli atomi di impurezze che entrano in soluzione solida inducono deformazioni reticolari attorno ad ogni atomo ospitante ostacolando lo scorrimento delle dislocazioni. Tali distorsioni sono tanto maggiori quanto più elevata è la differenza tra i raggi atomici e quanto più elevata è la quantità di atomi di soluto dispersi. Nello specifico, se:

- Atomo di impurezza ha raggio minore dell'atomo ospitante: con la sostituzione si determinano nel reticolo cristallino deformazioni di trazioni sugli atomi che lo circondano
- Atomo di impurezza ha raggio maggiore dell'atomo ospitante: si creano deformazioni di compressione sugli atomi vicini
- Atomi di impurezza ha raggio simile dell'atomo ospitante.

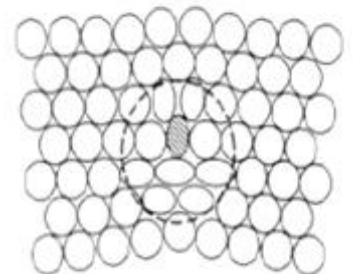
È inoltre importante sottolineare che la distribuzione degli atomi può essere casuale o ordinata. In questo modo si hanno due diversi casi:

1. Soluzioni solide disordinate = atomi sostituzionali sono disposti in maniera casuale e disordinata, senza un rapporto numerico definito con gli atomi dell'elemento stesso. Tali soluzioni richiedono uno sforzo inferiore
2. Soluzione solida ordinate = esiste un rapporto stechiometrico, numerico tra gli atomi propri del reticolo e quelli sostituiti. Si viene dunque a creare una lega fragile e quindi lo sforzo per deformare questo materiale è più alto perché si deve rompere un vero e proprio ordine.

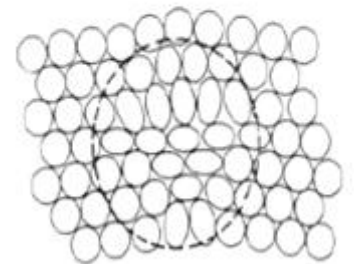
In generale gli atomi di soluto tendono a diffondere e segregare intorno alle dislocazioni in modo da ridurre l'energia di deformazione totale, in modo cioè da annullare parte della deformazione del reticolo che circonda la dislocazione. Per ottenere questo risultato un atomo di lega più piccolo si dispone dove la sua deformazione di trazione può compensare parzialmente la deformazione di compressione della dislocazione.



a) Atomo di maggiori dimensioni



b) Atomo di minori dimensioni

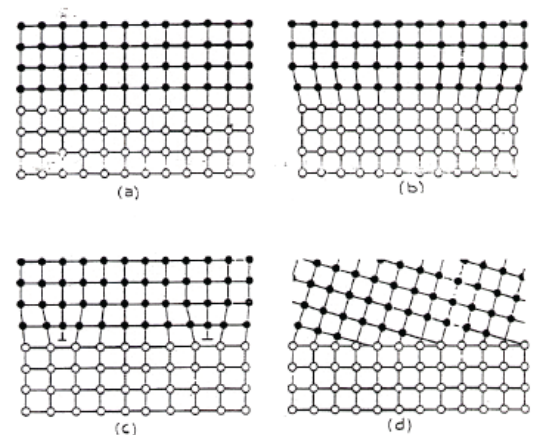


c) Atomo delle stesse dimensioni

## Particelle deformabili

Se all'interno di un reticolo vengono inserite particelle assestanti che dunque non si amalgamano nel reticolo cristallino si parla di particelle deformabili; anche queste ovviamente influenzano la mobilità delle dislocazioni. Queste particelle, essendo isolate, sono disposte secondo un reticolo cristallino diverso rispetto a quello della matrice originale. Dal momento in cui le dislocazioni si muovono sui piani di massima compattazione il fatto di avere reticoli diversi influenzerà il moto stesso delle dislocazioni:

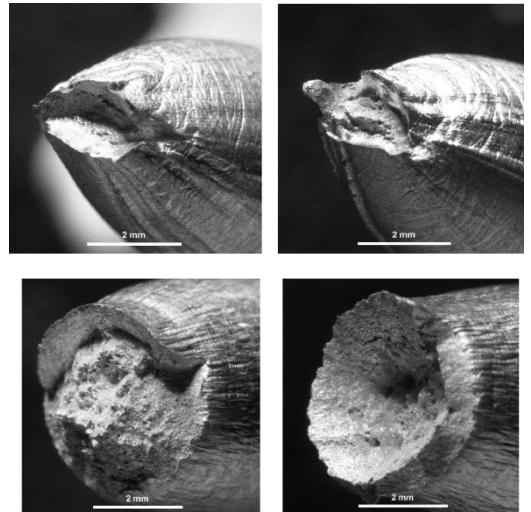
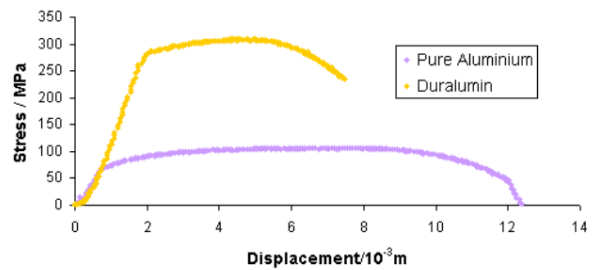
- a. Particelle coerenti = hanno reticolo cristallino esattamente uguale a quello della matrice che li ospita. Possono essere attraversate dalle dislocazioni perché hanno piani di massima compattazione coerenti. Avviene dunque un incremento dell' $R_m$  e  $R_{p0.2}$  e una riduzione dell'allungamento percentuale quindi non le dislocazioni non vengono fermate ma solo rallentate.
- b. Particelle semicoerenti = hanno un reticolo non esattamente uguale ma neanche completamente diverso; infatti tramite qualche distorsione è possibile creare una continuità di piano tra i due reticoli
- c. Particelle semicoerenti
- d. Particelle incoerenti = hanno reticoli completamente diversi. Tali particelle non possono essere attraversate dalle dislocazioni; per superare le dislocazioni devono piegarsi tra una particella e l'altra e ciò è possibile solo a seguito di un aumento dello sforzo. Dunque le

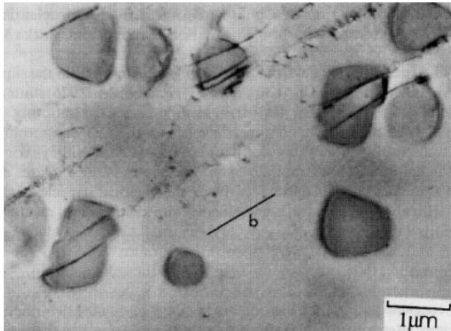
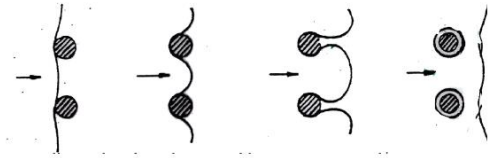
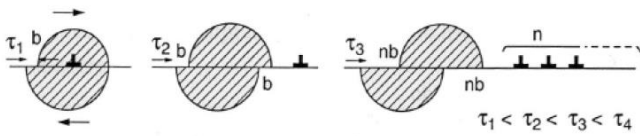


dislocazioni si inarcano tra le particelle e si instaura così il meccanismo di Frank e Read per cui avviene una moltiplicazione delle dislocazioni. Quindi tale particelle producono un rafforzamento molto maggiore rispetto a quelle coerenti. Il materiale diventa però fragile perché quando si incontrano dislocazioni ad anello si creano campi di sforzi che portano alla rottura. L'efficacia di questo rafforzamento dipende da due condizioni: le particelle devono essere molto piccole,  $< 10\text{-}20\ \mu\text{m}$ , e inoltre la frazione volumica deve essere elevata. Tali particelle si possono ottenere per due diverse vie:

- Precipitazione tramite raffreddamento della lega
- Inserimento di particelle solide nel metallo quando questo è fuso

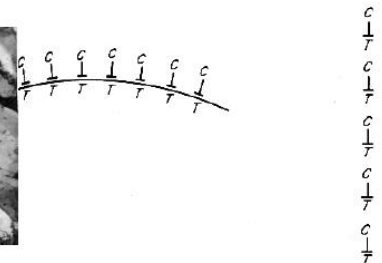
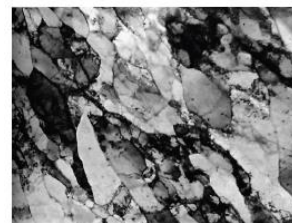
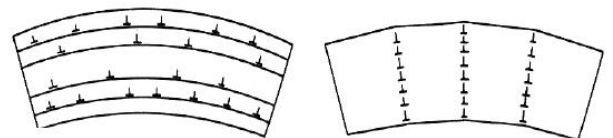
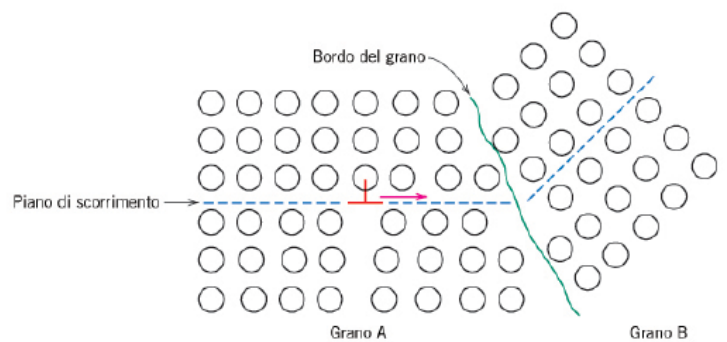
**Esempio:** L'alluminio è un metallo considerato fragile, facilmente deformabile; il duralluminio invece è più resistente. Il duralluminio è una lega costituita da alluminio e rame: il rame rinforza l'alluminio solo quando precipita divenendo una particella all'interno della lega, e quindi solo dopo un determinato lasso di tempo. Tale proprietà fu scoperta casualmente su un campione lasciato in laboratorio venerdì e ripreso solo il lunedì seguente. Di fatto aggiungendo del rame all'alluminio si potenzia lo sforzo di rottura dell'alluminio puro.





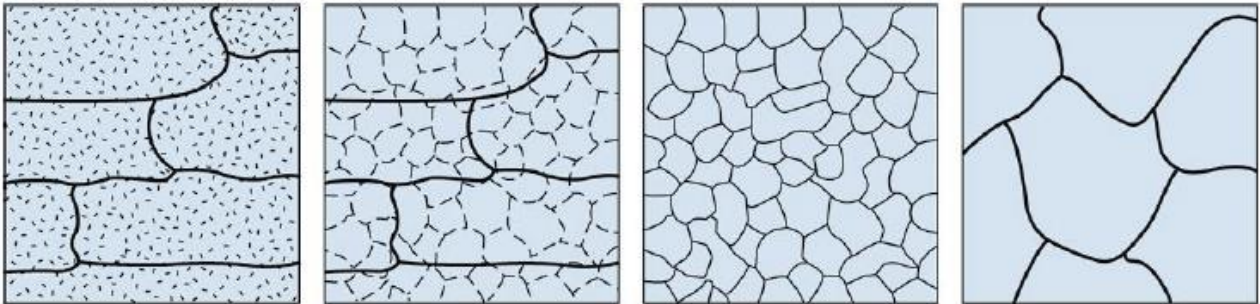
### Affinazione del grano

I bordi di grano si comportano come barriere all'avanzamento delle dislocazioni perché separano due cristalli che hanno diversa orientazione ed esiste uno stato di disordine in corrispondenza del bordo di grano. Dunque le dislocazioni tenderanno ad addensarsi in questi punti che inducono concentrazioni di tensioni davanti ai loro piani di scorrimento, creando nuove dislocazioni nei grani adiacenti. Bordi di grano piccolo non sono efficaci nel contrastare il processo di scorrimento a causa del loro scarso disallineamento cristallografico quindi bloccando lo scorrimento aumentano la resistenza del materiale. Nello specifico minore sono i bordi di grani maggiore sarà la resistenza del materiale stesso. In generale esiste una legge matematica detta di Hall-Petch che descrive come il limite di snervamento vari con la dimensione del grano:  $\sigma = \sigma_{int} + k \frac{1}{\sqrt{D}}$  dove  $\sigma_{int}$  è la resistenza allo scorrimento all'interno del grano,  $k$  è una costante del materiale e  $D$  è il diametro medio dei grani. La riduzione della dimensione del grano migliora oltre alla resistenza anche la duttilità della lega. È possibile modificare le dimensioni del grano in due modi:



1. Controllando la velocità di raffreddamento = controllando la temperatura è possibile raffinare i grani

2. Con la deformazioni plastica e la ricristallizzazione = è un processo realizzato mediante riscaldamento in base al quale i grani deformati vengono sostituiti da una nuova serie di grani che vengono sottoposti a crescita finché non si consumano completamente i grani originali. Per i materiali allotropici la ricristallizzazione dipende solo dalla temperatura. Se invece non abbiamo materiali allotropici è possibile sfruttare la deformazione plastica: se fornisco temperatura dopo una deformazione plastica è possibile ottenere la ricristallizzazione. Le dislocazioni si accumulano in pila in un punto dando origine a un bordo di grano: grano che non ha al suo interno dislocazioni e quindi facilmente deformabile.



## Diffusione

Con il termine diffusione si indica il meccanismo di trasporto della materia nei solidi, nei gas e nei liquidi. È necessario dunque tenere conto che gli atomi nello stato solido si possono muovere sfruttando la diffusione. Studiando nello specifico rame e nichel e osservando il reticolo sembra che non sia possibile fare muovere gli atomi perché il reticolo sembra essere ideale in realtà ci sono molti difetti di punti che permettono il moto degli atomi di posizioni reticolare in posizione reticolare così da modificare l'interfaccia di una faccia reticolare. Sfruttando tempo e temperatura, vacanze e punti interstiziali è possibile far muovere atomi allo stato solido.

Il sistema ci guadagna anche da un punto di vista energetico: il sistema alle equilibrio tenderebbe a non avere interfacce ma se non fornisco tempo o energia gli atomi non si muovono perché nel passaggio da una posizione a un'altra il singolo atomo dovrebbe spostare in maniera temporanea due atomi vicini così da poter passare. Esiste una legge che descrive la dipendenza

del coefficiente di diffusione dalla temperatura:  $D = D_0 e^{\left(\frac{-Q_d}{RT}\right)}$  dove:

- $D_0$  è la grandezza indipendente dalla temperatura
- $Q_d$  è l'energia di attivazione della diffusione
- $R$  è la costante dei gas
- $T$  è la temperatura assoluta

Esistono leggi che descrivono come gli atomi si muovono nel reticolo cristallino. Gli atomi si muovono più facile se c'è spazio nel reticolo cristallino. Tra il cubo a facce copro centrato e il cubico a facce copro centrato il secondo ha più spazio all'interno del reticolo, spazio libero uniformemente distribuito. Cubico a facce centrate ha più spazio occupato e lo spazio lasciato libero nel reticolo è la lacuna più grande. Siccome la diffusione è legata al movimento degli atomi nel reticolo sarà favorito nel cubo a facce centrate piuttosto che in quello a facce centrate. Su questo meccanismo si basano le ossidazioni e cementazioni. Inoltre è proprio la diffusione che permette al bordo di grano di ingrandirsi a cui si riducono molte proprietà meccaniche.