

## 4. Struttura cristallina reale – difetti e proprietà

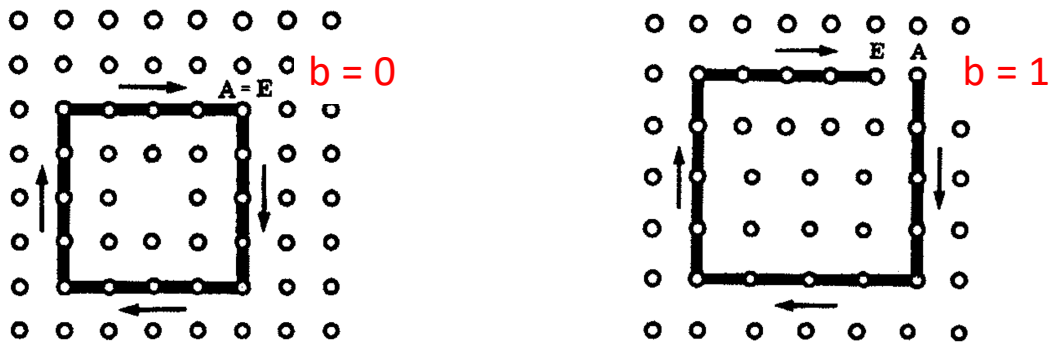
---

- 4.1 Terminologia e classificazione dei “difetti” – cristalli reali
- 4.2 Difetti di punto: vacanze, atomi sostituzionali, interstiziali
- 4.3 Difetti di linea – dislocazioni
- 4.4 La legge di Schmidt
- 4.5 Difetti di superficie – bordi di grano
- 4.6 Controllare le proprietà tecnologiche dei metalli
- 4.7 Riassunto
- 4.8 Domande di verifica

## 4.1 Tipi e classificazione dei difetti

Difetti reticolari vengono classificati secondo la loro dimensione, la classificazione viene fatto con il vettore di Burgers  $b$ :

1. Difetti di punto (dimensione zero) – vacanze, atomi sostituzionali, intertiziali
2. Difetti di linea (dimensione uno) - dislocazioni
3. Difetti di superficie (dimensione due) – bordi di grano

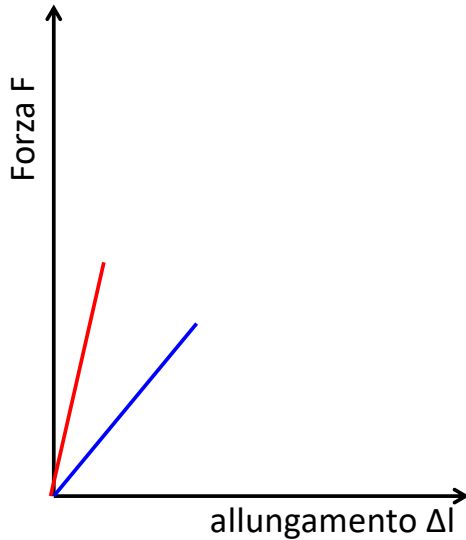


I difetti determinano / influiscono le proprietà meccaniche dei metalli.

## 4.3 Difetti di linea – dislocazioni

---

Sotto sforzo di trazione materiali metallici si deformano in maniera elastica, cioè si allungano proporzionalmente alla forza applicata.

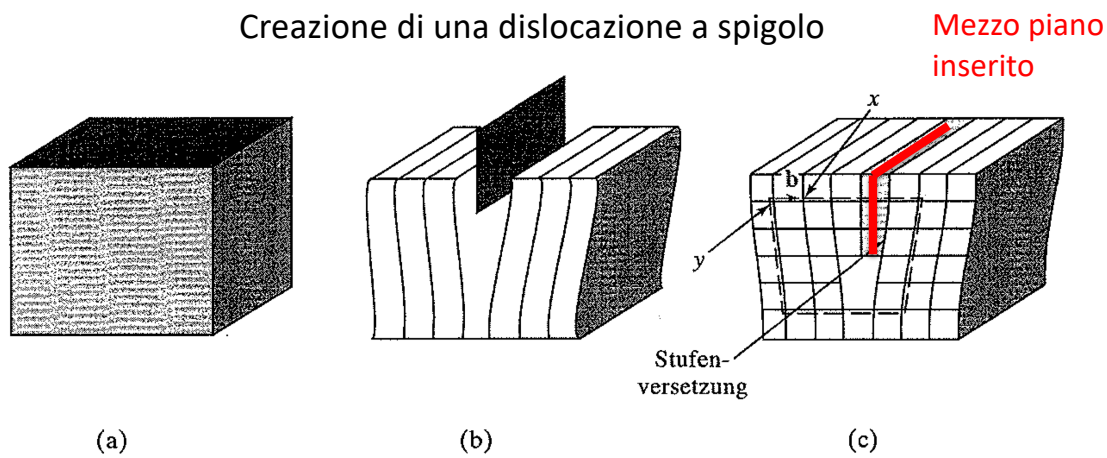


### Esercizio

1. Spiegare la differenza tra Fe e Al
2. Che cosa succede quando in un metallo con struttura cristallina ideale la forza F viene aumentato sempre di più ?
3. Che cosa succede in realtà ?

## 4.3 Dislocazioni a spigolo


Dislocazioni sono difetti lineari nel reticolo cristallino. Le dislocazioni si formano durante la solidificazione o durante processi di deformazione.

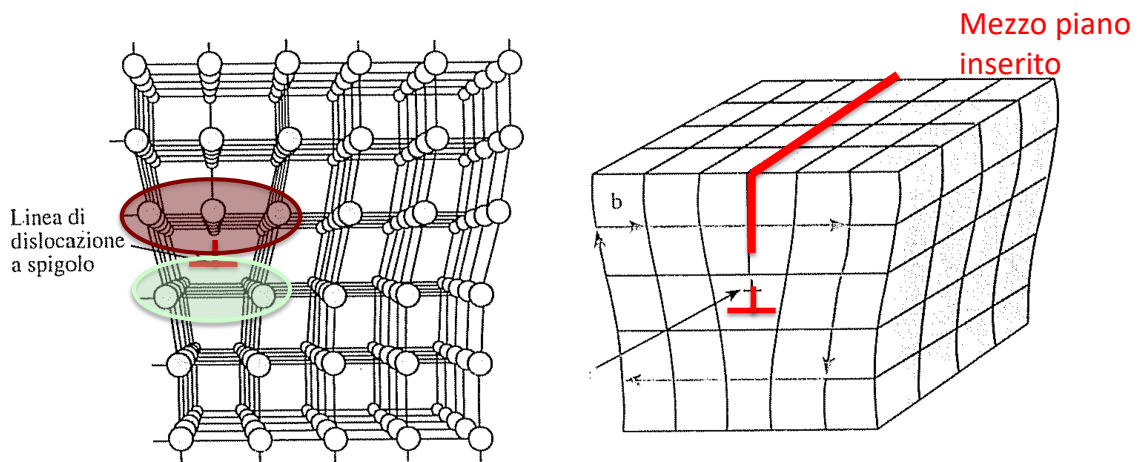


Il cristallo perfetto (a) viene tagliato parzialmente a metà (b) e si inserisce un mezzo piano aggiuntivo (c)

Il vettore di Burgers è perpendicolare alla dislocazione

## 4.3 Dislocazione a spigolo

La dislocazione a spigolo consiste in un difetto lineare localizzato appena sopra il "T rovesciato"  dove è presente un mezzo piano aggiuntivo nel reticolo.

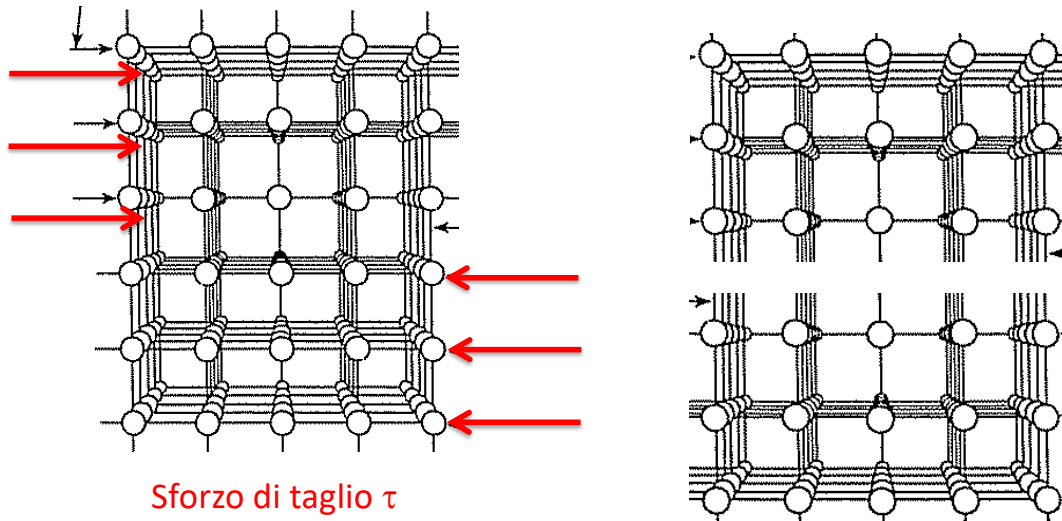


Esaminare le forze esercitate sugli atomi vicino alla dislocazione.

## 4.3 Deformazione sotto sforzo di taglio

---

**Senza dislocazioni:** deformazione elastica, rottura fragile tra i piani



Tutti i legami in un intero piano si devono rompere: alta energia necessaria

## 4.3 Esperimento con un grande tappeto

---

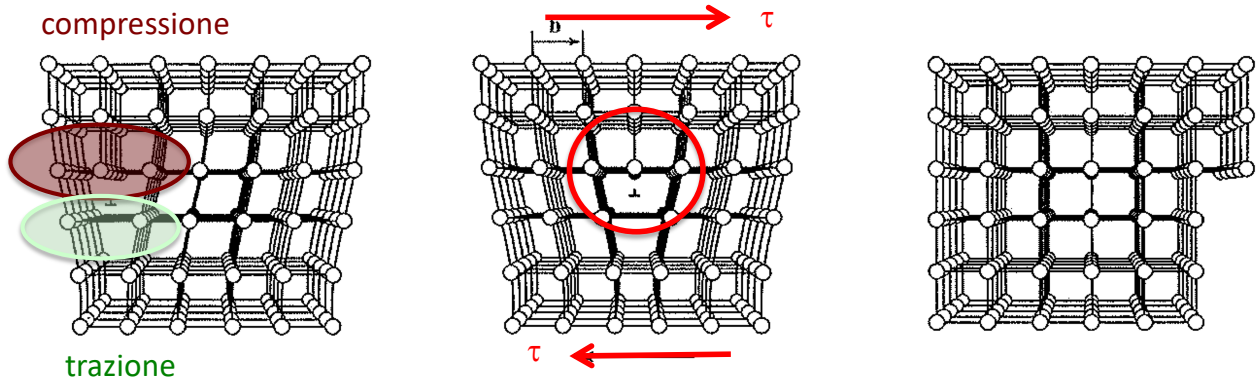
Un problema pratico: come spostare un grande tappeto ?



**Come si può spostare questo tappeto (quasi) senza sforzo ?**

## 4.3 Deformazione sotto sforzo di taglio

In presenza di dislocazioni: movimento delle dislocazioni, deformazione plastica



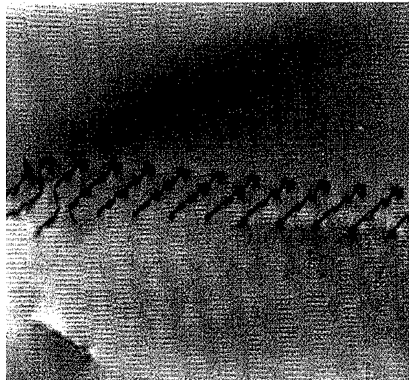
Lo sforzo di taglio  $\tau$  esterno si somma con la compressione/trazione interna.

La parte del cristallo lontano dalla dislocazione rimane intatto e non cambia.  
Solamente al punto della dislocazione viene spostato un unico legame chimico.  
-> questo passo si fa con poca energia.

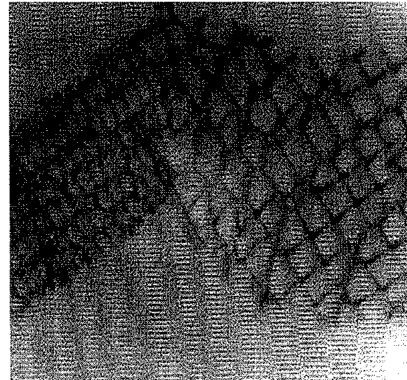
## 4.3 Dislocazioni al TEM

---

La presenza di dislocazioni è stato ipotizzato molto tempo prima che potevano essere osservati nel microscopio elettronico a trasmissione (TEM).



Tamponamento di dislocazioni  
magnificazione x 36500

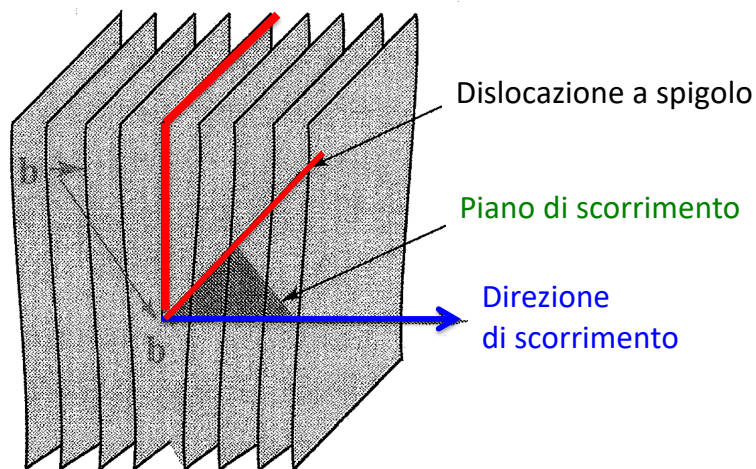


Foresta di dislocazioni  
magnificazione x 15750

La densità di dislocazioni nei metalli è molto alto. Metalli molto duttili  $10^6$  cm/cm<sup>3</sup>, dopo forte deformazione plastica  $10^{12}$  cm/cm<sup>3</sup>.

## 4.3 Scorrimento delle dislocazioni

Il movimento delle dislocazioni nel cristallo si chiama **scorrimento**.



La **direzione di scorrimento** e la linea della **dislocazione** definiscono il piano di scorrimento.

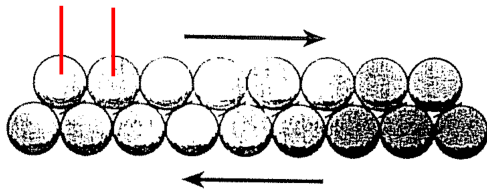
Direzione di scorrimento è parallelo al vettore di Burgers

**Direzione** e **piano** di scorrimento sono un **sistema di scorrimento**. Le dislocazioni possono muoversi solamente in sistemi di scorrimento (come treni sui binari).

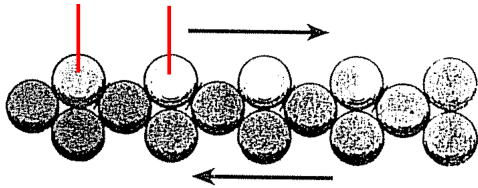
## 4.3 Sistemi di scorrimento

---

In quali sistemi di scorrimento si muovono le dislocazioni facilmente ?



**Piani compatti** – distanza tra gli atomi è minima -> movimento facile

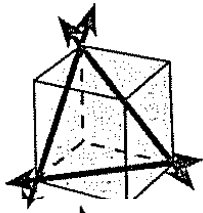


Piani non compatti – distanza tra gli atomi è grande -> movimento difficile

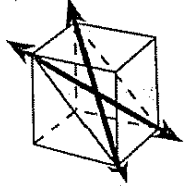
Le dislocazioni si muovono nei sistemi di scorrimento dove è necessario la minima energia (il minimo sforzo)

## 4.3 Sistemi di scorrimento

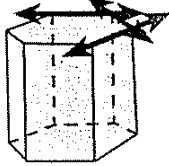
Versetzungen können nur in Gleitsystemen wandern. Bevorzugt sind (111) Ebenen.



**FCC:** Piani di scorrimento (111) perpendicolo alla diagonale di corpo, direzione [110]  
 $4 \times 3 = 12$  sistemi di scorrimento **compatti**



**BCC:** Piani di scorrimento (110) parallelo alla diagonale di faccia. Direzione [111]  
48 sistemi di scorrimento **non compatti**



**HCP:** Piani di scorrimento (0001) perpendicolo all'asse z  
Direzione [1120]  
 $1 \times 3 = 3$  sistemi di scorrimento **compatti**

Le dislocazioni si muovono nei sistemi di scorrimento dove è necessario la minima energia (il minimo sforzo)

## 4.3 Effetto della struttura cristallografica

---

La struttura cristallografica determina il numero e tipo dei sistemi di scorrimento e lo sforzo di taglio critico risolto  $\tau_{crit}$

| Parametro              | CFC        | CCC         | EC           |
|------------------------|------------|-------------|--------------|
| $\tau_{crit}$ [MPa]    | 0.35 – 0.7 | 35 – 70     | 0.35 – 0.7   |
| Sistemi di scorrimento | 12         | 48 (non c.) | 3            |
| Comportamento          | duttile    | resistente  | rel. fragile |

lo sforzo di taglio critico risolto  $\tau_{crit}$  in piani compatti (CFC, EC) è di 100 volte inferiore rispetto ai sistemi CCC.

**Metalli duttili:** alluminio, rame, nichel, piombo, oro, argento, .... tutti CFC

**Metalli resistenti:** ferro, cromo, molibdeno, tungsteno, .... tutti CCC

## 4.3 Importanza delle dislocazioni

---

La presenza delle dislocazioni spiega perché la resistenza dei metalli è minore della resistenza teorica.

Lo **scorrimento delle dislocazioni** spiega la possibilità di deformazione plastica dei metalli. Senza dislocazioni i metalli sarebbero molto resistenti ma fragili. Una deformazione plastica non sarebbe possibile.

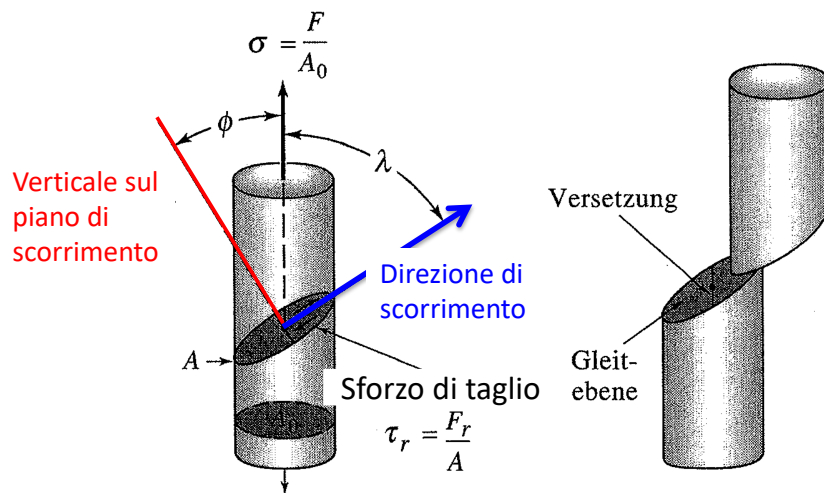
Deformazione plastica facile significa che il movimento delle dislocazioni è facile. Questo spiega la duttilità alta dei metalli con reticoli CFC (piani compatti).

Lo scorrimento delle dislocazioni può essere influenzato dai difetti reticolari:

- Difetti di punto distorcono il reticolo e riducono la mobilità delle dislocazioni
- Dislocazioni presenti nel cristallo ostacolano il movimento di altri
- Bordi di grano sono ostacoli insuperabili per le dislocazioni

## 4.4 La legge di Schmidt

Lo sforzo di taglio  $\tau_r$  per lo scorrimento delle dislocazioni che risulta da una forza di trazione  $F$  dipende dalla geometria: angolo  $\phi$  e  $\lambda$



$$F_r = F * \cos \lambda,$$

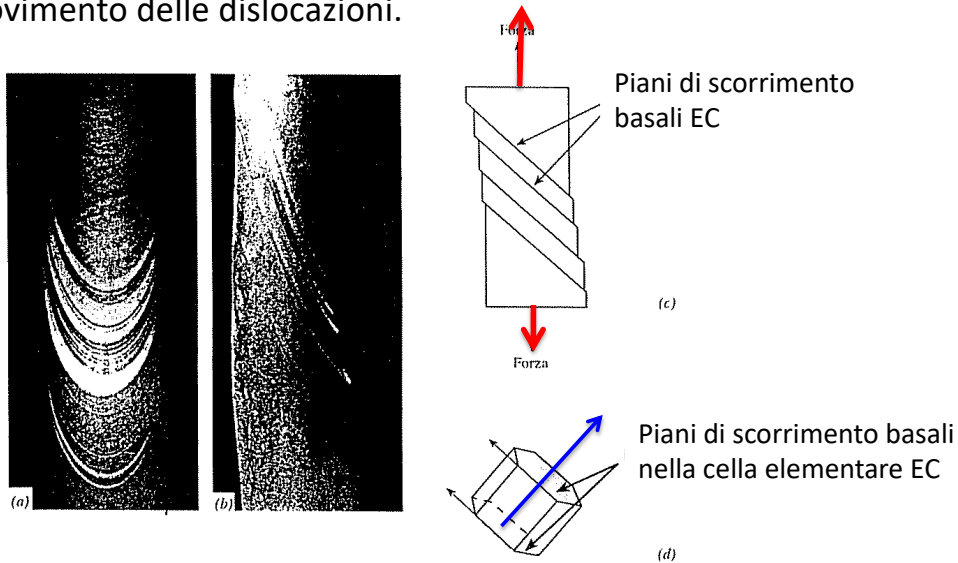
$$A = A_0 / \cos \phi,$$

$$\tau_r = \sigma * \cos \phi * \cos \lambda$$

$\tau_r$  diventa massimo quando i due angoli  $\phi$  und  $\lambda$  sono di circa  $45^\circ$ .

## 4.4 La legge di Schmidt

Per far muovere le dislocazioni in un dato sistema di scorrimento lo sforzo di taglio  $\tau_r$  deve essere maggiore di  $\tau_{crit}$ . Lo sforzo di taglio deve agire nella direzione di movimento delle dislocazioni.

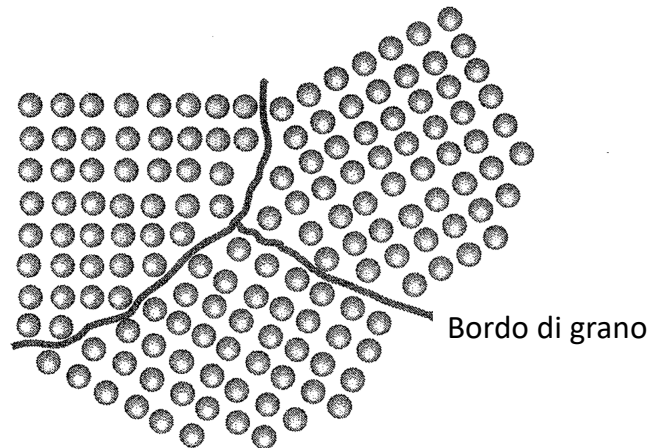


La probabilità che un sistema di scorrimento è sotto  $45^\circ$  è alto in reticoli CFC.

## 4.5 Bordi di grano

---

Materiali metallici sono policristallini (molti cristalli singoli)



Atomi ai bordi di grano (“superficie” dei cristalli) non sono in un reticolo perfetto, dunque hanno un’energia più elevata.  
In una soluzione aggressiva questi atomi si sciolgono preferenzialmente e per questo i bordi di grano diventano visibili nel microscopio.

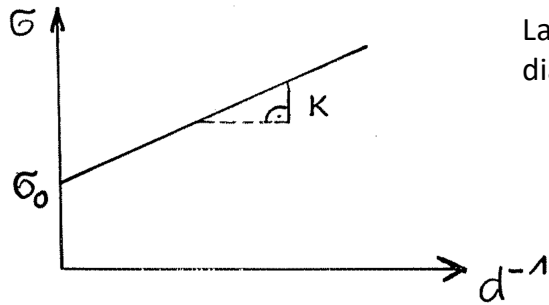
## 4.5 Indurimento per grani fini

---

I bordi di grano sono **ostacoli insuperabili** per le dislocazioni (disordinati). Grani piccoli aumentano il numero di bordi di grano e così anche la resistenza meccanica.

$$\sigma_y = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2}$$

Hall-Petch



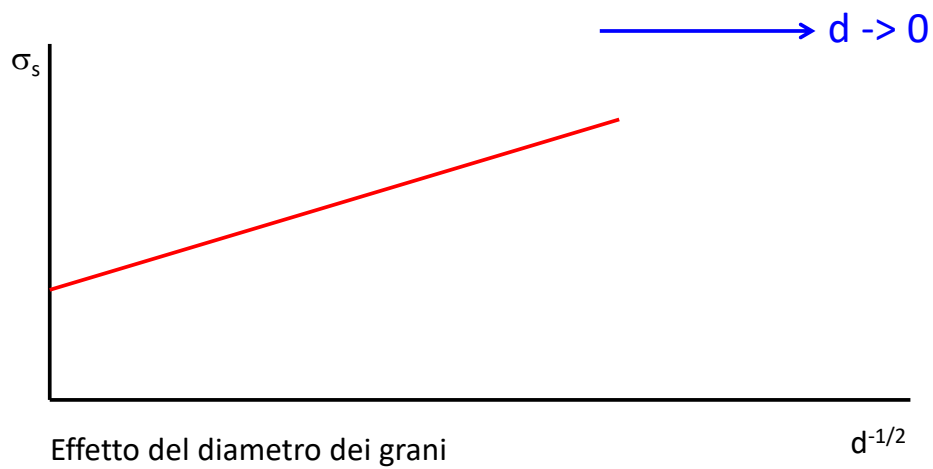
La resistenza  $\sigma$  aumenta al diminuire del diametro dei grani  $d$ .

Equazione di Hall-Petch:  $\sigma_s = \sigma_0 + K * d^{-1/2}$

## 4.5 Esperimento teorico

---

Che cosa succede se il diametro dei grani sta arrivando vicino a zero ?



Quale comportamento meccanico avrà un materiale del genere ?

## 4.6 Controllare le proprietà tecnologiche

---

In un cristallo con reticolo non-disturbato le dislocazioni si muovono appena che lo sforzo di taglio è  $>$  di  $\tau_{crit}$  ist. -> **struttura cristallografica, CFC = duttile**

Difetti reticolari impediscono o bloccano **il movimento delle dislocazioni**:

-> difetti di punto: atomi, alligazione (**indurimento per soluzione solida**)

-> difetti di linea: dislocazioni (**deformazione a freddo**)

-> difetti di superficie: bordi di grano (**indurimento per grani fini**)

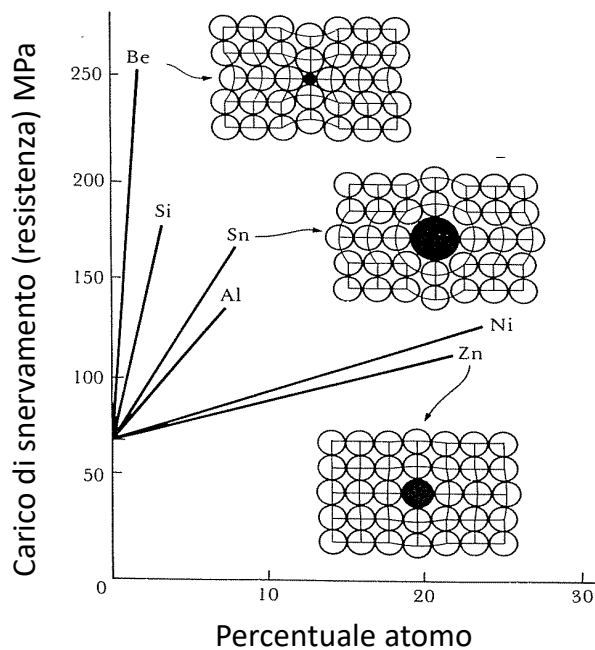
Così si presentano delle **possibilità tecnologiche** per modificare le proprietà meccaniche (resistenza, duttilità) **in maniera mirata** tramite il tipo e il numero dei difetti reticolari.

Dislocazioni si muovono facilmente – duttile

Dislocazioni impediti – resistente, duro

Dislocazioni bloccati – resistente ma fragile

## 4.6 Indurimento per soluzione solida



Materiale di base: rame  
Carico di snervamento 70 MPa

**Be** in lega. Atomo sostituzionale molto piccolo  
Reticolo fortemente disturbato

**Sn** in lega. Atomo sostituzionale grande, raggio > rame  
Reticolo disturbato

**Zn e Ni** in lega. Raggi atomici sono identici come raggio di rame.  
Reticolo poco disturbato

Un reticolo (fortemente) deformato impedisce il movimento delle dislocazioni  
In questa maniera aumenta la resistenza meccanica

## 4.7 Riassunto

---

Difetti reticolari (punto, linea e superficie) sono imperfezioni del reticolo ideale, ma sono **positivi** per molte proprietà tecnologiche.

Difetti di punto, soprattutto atomi sostituzionali e interstiziali, **distorgono** nella loro vicinanza il **reticolo**; **questo impedisce il movimento delle dislocazioni**.

La duttilità dei materiali metallici è dato dal **numero e tipo dei sistemi di scorrimento**. Metalli e leghe CFC hanno sforzo di taglio  $\tau_{crit}$  basso (piani compatti) e 12 sistemi di scorrimento. -> CFC = duttile

**Bordi di grano** bloccano il movimento delle dislocazioni e questo aumenta la resistenza meccanica dei materiali metallici.

Numero e tipo dei difetti reticolari **influiscono il movimento delle dislocazioni**. **Questo permette di controllare le proprietà meccaniche dei materiali metallici**.

## 4.7 Domande

---

- **Spiegare perché tutti i metalli con reticolo CFC (alluminio, nichel, oro, rame etc.) sono molto duttili.**
- **Perché zinco si comporta in maniera fragile, nonostante il suo reticolo EC contiene piani compatti ?**
- **Perché il ferro (anche acciaio) di solito viene lavorato solamente a temperature alte (vedi il fabbro) ?**
- **Come si comporta un materiale metallico (monocristallo) privo di dislocazioni quando viene sottoposto a forze di trazione molto alte ?**
- **Perché una rottura (frattura) duttile si manifesta spesso con un angolo di 45° verso l'asse di trazione ?**