

P. Ferro, A. Tiziani

MATERIALI METALLICI e LABORATORIO

I difetti cristallini

A.A. 2008/2009

2° Anno Ingegneria Gestionale - Nuovo Ordinamento

1

- Generalità sui difetti
- Difetti puntiformi
- Difetti planari
- Difetti lineari
- Movimento delle dislocazioni

2

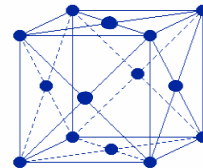
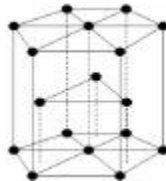
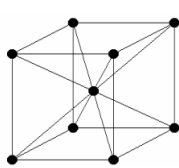
I reticoli cristallini e i difetti

TABLEAU. Défauts cristallins élémentaires.

Type du défaut		Nom du défaut
Thermique		Phonon.
Électronique		Électron Trou Exciton.
Atomique	Ponctuel	Lacune Interstitial Atome étranger
	Linéaire	Dislocation
	Plans	Défaut d'empilement Interface, joints de grains

3

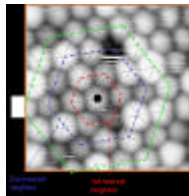
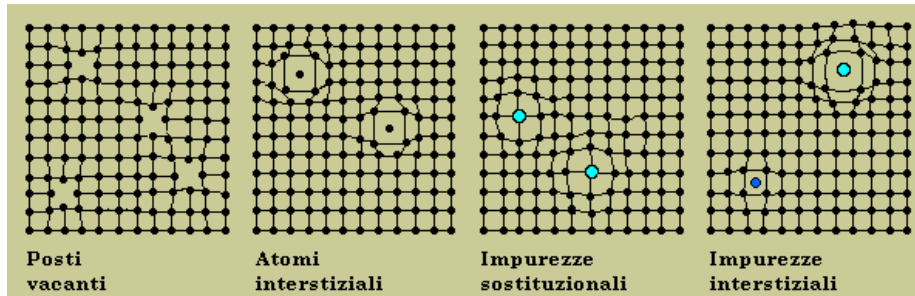
I reticoli cristallini



Presenza di difetti:
puntiformi, lineari, planari

4

I difetti puntiformi

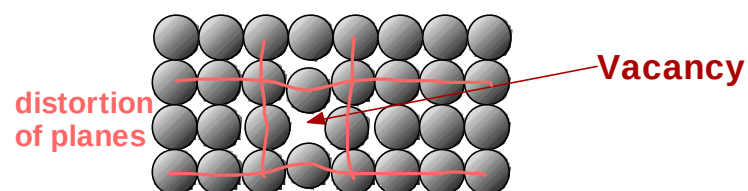


An STM image of a self-assembled Au cluster array. The hexagonal lines illustrate the unit cell properties of the cluster array. A defect vacancy is clearly evident. The image was taken under ultra-high vacuum conditions. Image by T. Lee.

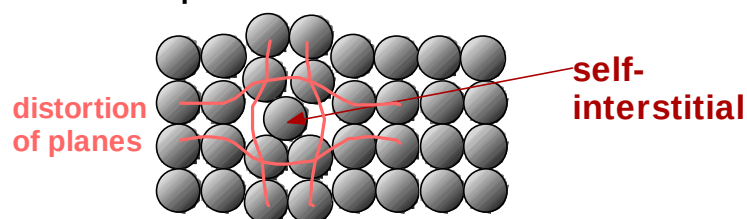
5

Difetti puntiformi

- **Vacanze:**
-siti atomici vacanti.



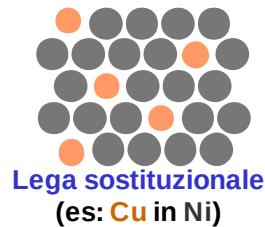
- **Self-Interstitials:**
-atomi "extra" posizionati tra i siti interstiziali.



6

Difetti puntiformi nelle leghe

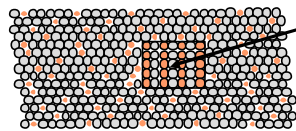
- Soluzione solida di B in A



O



- Soluzione solida di B in A più particelle di una nuova fase (usualmente per un largo incremento di B)



Particella di seconda fase
-- composizione differente
-- spesso struttura differente.

7

I difetti puntiformi

STUDI SPERIMENTALI

All'equilibrio termico

{ per riscaldamento
alla temperatura di misura

Fuori dall'equilibrio

{ per tempra
per incrudimento
per irraggiamento
per impianto

8

I difetti puntiformi

OSSERVAZIONE E MISURE DELLE CONCENTRAZIONI DI DIFETTI

1. Misure dimensionali

allungamento
densità
parametri cristallini

2. Misure termiche

calore specifico
entalpia immagazzinata

9

I difetti puntiformi

OSSERVAZIONE E MISURE DELLE CONCENTRAZIONI DI DIFETTI

3. Misure elettriche → resistenza a bassa T

4. Misure magnetiche

5. Microscopia elettronica a trasmissione

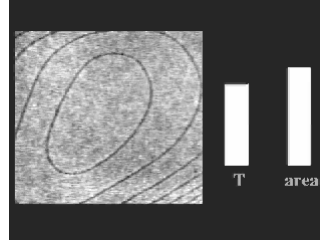
6. Microscopia ionica a campo

7. Misure delle costanti elastiche e delle proprietà plastiche

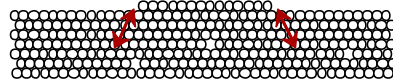
10

Osservazione della concentrazione di eq. delle vacanze.

- Microscopio ad elettroni a bassa energia: vista del piano (110) della superficie di NiAl.
- l'aumento di T causa crescita delle isole superficiali di atomi.
- Perché? La concentrazione di eq. delle vacanze aumenta per movimento di atomi dal cristallo alla superficie dove si uniscono alle isole.



Island grows/shrinks to maintain equil. vacancy conc. in the bulk.



11

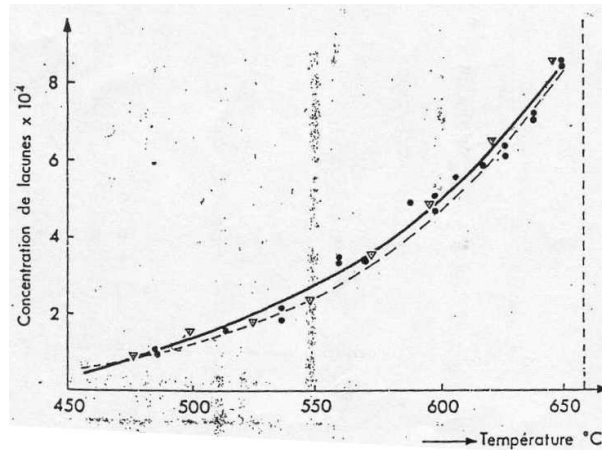
I difetti puntiformi

I DIFETTI PUNTIFORMI
POSSONO ESSERE CREATI

- PER **DEFORMAZIONE** PLASTICA,
- **IRRAGGIAMENTO** DI PARTICELLE CON SORGENTI AD ALTA ENERGIA,
- PER SEMPLICE EFFETTO DELLA **TEMPERATURA**

12

I difetti puntiformi



Concentrazione di lacune nell'alluminio in funzione della temperatura.

13

I difetti puntiformi

La variazione di energia libera per la formazione dei difetti è data dalla relazione:

$$\Delta G = n_v \Delta G_f / N_A - TDS$$

ΔG = variazione di energia libera

n_v = numero difetti (vacanze o interstiziali)

ΔG_f = energia di formazione di una mole di difetti

Alle condizioni di equilibrio (ΔG minimo) si avrà:

$$n_{eq} = n_t e^{-\Delta G_f / RT}$$

n_{eq} = numero di difetti all'equilibrio per cmc

n_t = numero totale di siti atomici per cmc

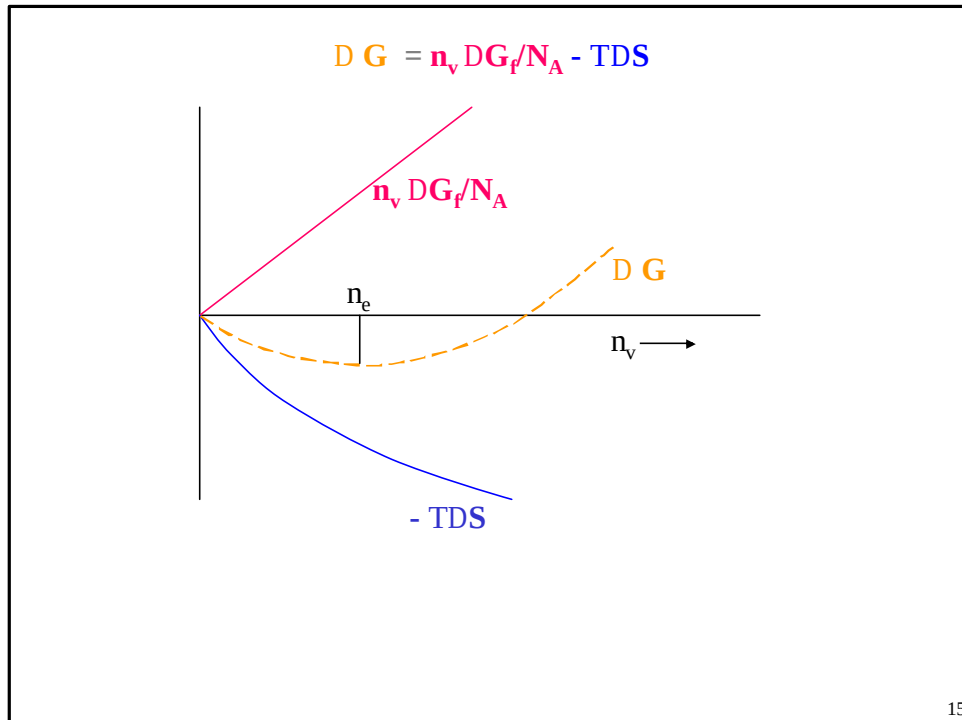
R = 8,31 J/mole K

ΔG_f = energia richiesta per rimuovere una vacanza,
espressa in J/mole

$$k_B = \frac{R}{N_A}$$

Un cristallo perfetto non è mai in equilibrio termodinamico

14



I difetti puntiformi

ΔG_f interstiziale » 2 - 4 ΔG_f vacanza

di conseguenza n_{eq} per gli interstiziali
è molto più basso rispetto a quello per le vacanze

in generale, a 20 °C,
il numero degli interstiziali è **E50** volte minore
di quello delle vacanze

Cu	300	800	1300 K	→ interstiziali
	10⁻⁶⁷	10 ⁻²⁵	10 ⁻¹⁵ n_{eq}/n_t	

ΔG_f interst. è elevato perché il volume
dei siti interstiziali è minore del volume degli atomi
che tendono a produrre grandi distorsioni attorno al difetto.

16

I difetti puntiformi

ΔG_f vale:

≈ 1 eV per FCC

≈ 3 eV per BCC

(1 eV = 23053 calorie per mole di particelle)

Ex. Per il rame ΔG_f vacanza = 1.3 eV

$n_{eq}/n_t = 1,3 \text{ E-4}$ a 1300 K

$n_{eq}/n_t = 6 \text{ E-7}$ a 800 K

$n_{eq}/n_t = 1 \text{ E-17}$ a 300 K

→ vacanze

A temperature prossime a quella di fusione il numero delle vacanze è in rapporto al numero di atomi del reticolo di 1 su 10.000, di cui circa 1% sono bilacune

17

I difetti puntiformi

Esempio

Calcolare il numero delle vacanze per cmc di rame a) a temperatura ambiente b) a 1084 °C (appena al sotto la temp. di fusione). Per produrre le vacanze nel Cu occorrono circa **83600 J/mole**.

Il parametro di cella del Cu F.C.C. è 3,6151 E-8 cm ed i nodi per cella sono 4

$$n = 4 / (3,6151 \text{ E-8})^3 = 8,47 \cdot 10^{22} \text{ atomi / cmc}$$

a) $T = 25 + 273 = 298\text{K}$

$$nv = 8,47 \cdot 10^{22} \exp(-83600 / (8,31 \cdot 298)) = 1,847 \text{ E8 v/cmc}$$

$$nv / n = 2,18 \text{ E-15}$$

18

I difetti puntiformi

b) $T = 1084 + 273 = 1357 \text{ K}$

$$n_v = 8,47 \cdot 10^{22} \exp \left(-\frac{83600}{8,31 \cdot 1357} \right) = 5,11 \cdot 10^{19} \text{ v/cmc}$$

$$n_v / n = 6,03 \cdot 10^{-4}$$

19

I difetti puntiformi

I problemi sono più complessi nei cristalli ionici a causa del bilanciamento delle cariche.

Le lacune possono essere cationiche o anioniche e per conservare il bilanciamento delle cariche deve avvenire che le vacanze:

a) siano in coppie di segno opposto cioè bivacanze

DIFETTO DI SHOTTKY

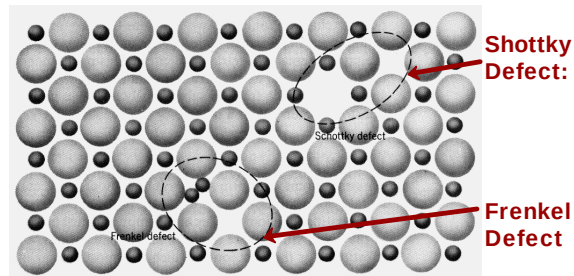
b) associate con un interstiziale dello stesso ione

DIFETTO DI FRENKEL

20

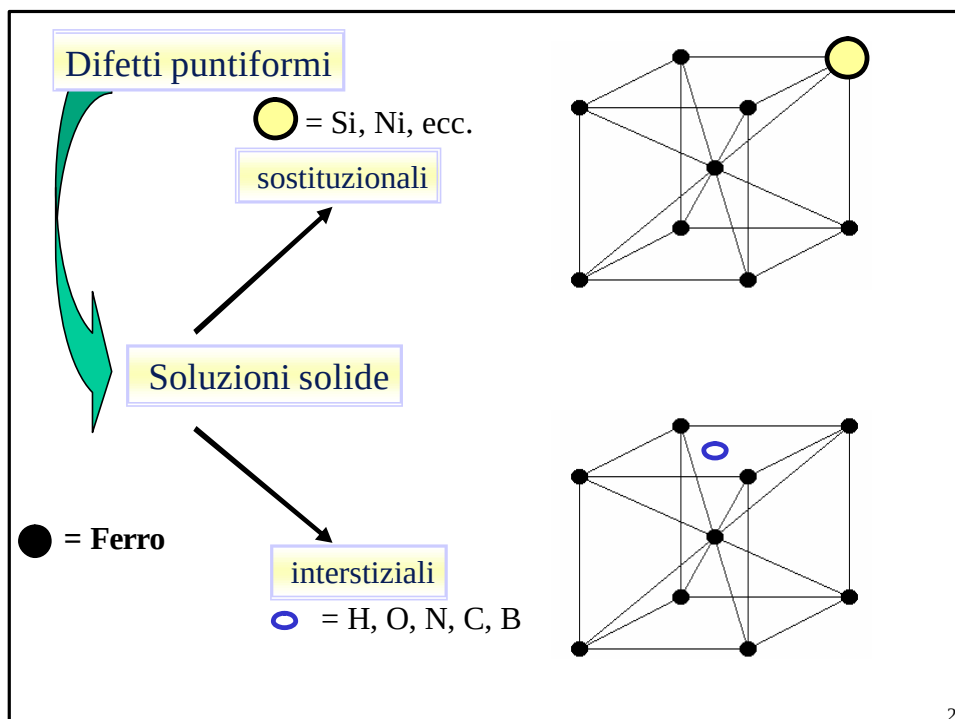
I difetti puntiformi

- **Difetto di Frenkel**
--a cation is out of place.
- **Difetto di Shottky**
--a paired set of cation and anion vacancies.



- **Equilibrium concentration of defects** $\sim e^{-Q_D/kT}$

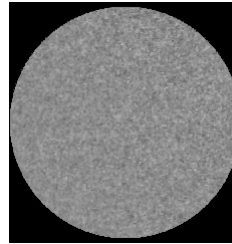
21



22

Alligazione di una superficie

- vista con microscopio ad elettroni a bassa energia della superficie (111) del Cu.
- Isole di Sn si muovono lungo la superficie e si 'legano' al Cu formando il 'bronzo' (lega sostituzionale)
- Le isole si muovono continuamente nelle regioni non legate e rilasciano minuscole particelle di bronzo nella loro scia
- Eventualmente, le isole spariscono

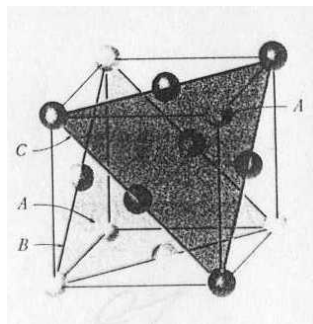


23

I difetti planari

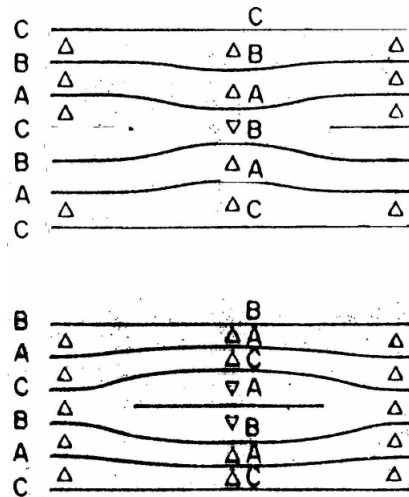
DIFETTI DI IMPILAGGIO

Sono difetti **planari** ed il nome indica che in una regione localizzata del cristallo è interrotta la sequenza regolare del reticolo cristallino. L'energia associata a tale difetto è compresa tra **1 - 1000 mJ/m²**.



24

I difetti planari



Difetti di impilaggio nel reticolo F.C.C. La normale sequenza di impilaggio dei piani (111) è denominata ABCA. I piani in relazione normale con gli altri sono separati da uno spazio pari a D , quelli con difetti di impilaggio da:

- un difetto di impilaggio **intrinseco** (figura sopra),
- un difetto di impilaggio **estrinseco** (figura sotto).

25

I difetti planari

BORDI GRANO

I solidi cristallini sono costituiti da un gran numero di GRANI separati da bordi.

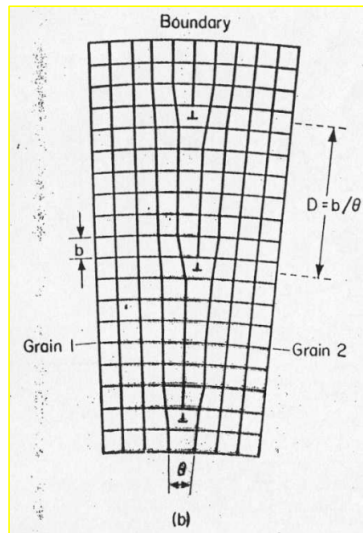
Quando la differenza di orientazione tra un grano ed un altro adiacente è minima abbiamo il difetto

BORDO A PICCOLO ANGOLO

se invece la differenza di orientazione è grande abbiamo i normali bordi grano.

26

I difetti planari

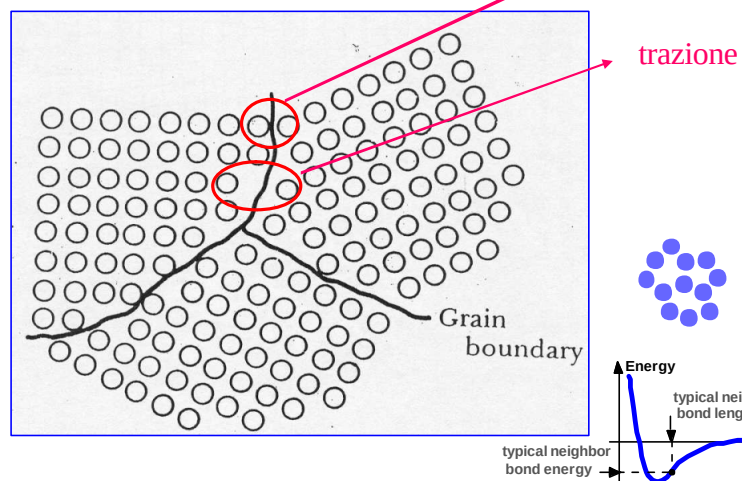


Rappresentazione
della disposizione
delle **dislocazioni**
al confine tra
due grani.

27

I difetti planari

Gli atomi in prossimità dei **bordi** di
tre grani non hanno una distanza o
una disposizione di equilibrio.

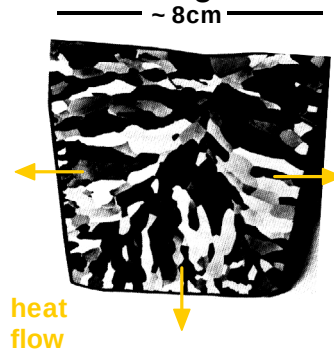
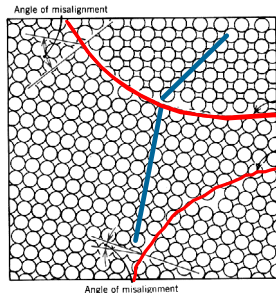


28

I difetti planari

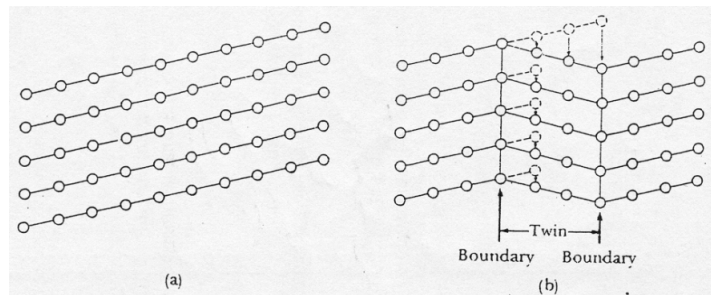
Bordi grano:

- sono i bordi dei diversi cristalli.
- vengono prodotti per esempio nel **processo di solidificazione**, • attraversandoli si ha una variazione dell'orientazione dei cristalli
- ostacolano il moto delle dislocazioni



29

I difetti planari

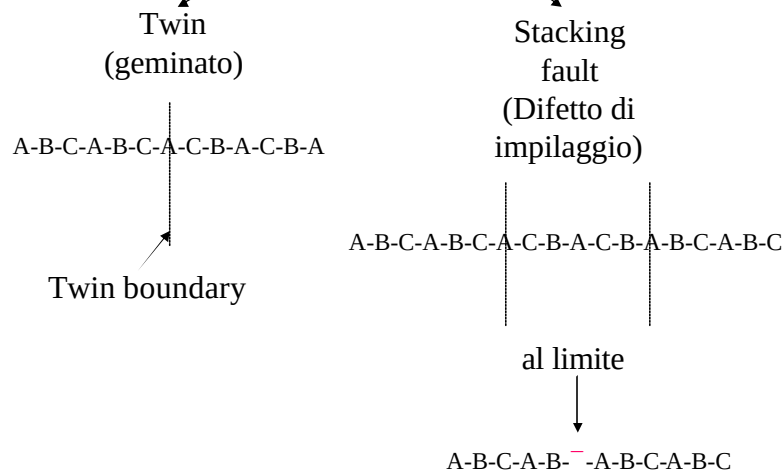


L'applicazione di uno sforzo ad un cristallo perfetto (a) può causare un disallineamento degli atomi (b), generando la formazione di un **"twin"** (geminato). Il cristallo è infatti stato deformato tramite una geminazione.

30

I difetti planari

Solitamente nelle strutture compatte FCC, HCP



31

I difetti planari

TABLE 4-4 Energies of surface imperfections in selected metals^a

Surface Imperfection (mJ m ⁻²)	Al	Cu	Pt	Fe
Stacking fault energy	200	75	95	— ^b
Twin boundary energy	120	45	195	190
Grain boundary energy	625	645	1000	780

^aAfter R. E. Reed-Hill, *Physical Metallurgy Principles*, 2nd Ed., D. Van Nostrand, 1973.

^bStacking faults do not occur in BCC metals such as iron.

32

I difetti lineari

DISLOCAZIONI

L'esistenza di questo difetto lineare è stato previsto teoricamente in numerosi studi (1934-1950) ed è stato previsto per riconciliare i valori sperimentali con quelli teorici

- τ traz. **teorico** = $E/10$ dyne/cm²
- τ traz. **reale** = $E/6$ dyne/cm².

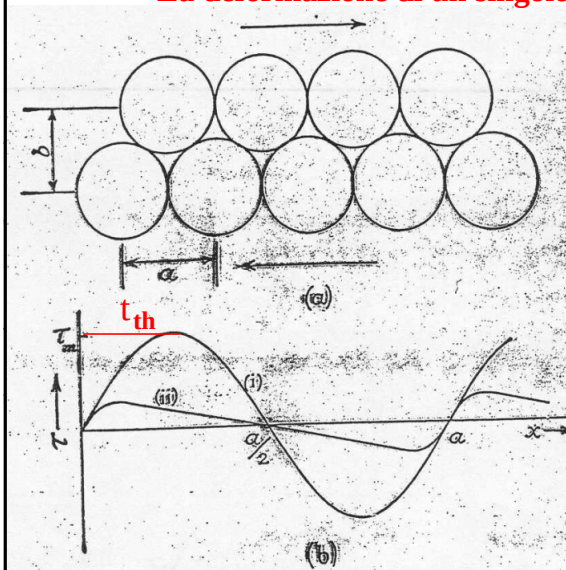
IN UN CRISTALLO PERFETTO LO SCORRIMENTO DI UN PIANO SOPRA L'ALTRO E' UN MOVIMENTO RIGIDO DI TUTTI GLI ATOMI DA UNA POSIZIONE AD UN'ALTRA.

LO SFORZO DI TAGLIO RICHIESTO PER TALE PROCESSO E' STATO CALCOLATO PER PRIMO DA **FRENKEL** (1926).

33

I difetti lineari

La deformazione di un singolo cristallo di metallo.



Si è assunto che è richiesta una forza periodica di taglio per muovere la fila superiore sull'inferiore.

a).

Viene applicato uno sforzo di taglio t a due piani di atomi.

b).

Variazione di t .

34

I difetti lineari

Secondo Frenkel: $\tau(x) = \tau_{th} \sin(2\pi x/a)$ (1)

$$\tau(x) = G\gamma = G(x/b) \quad (2)$$

dove G è il modulo di taglio, e le altre grandezze sono ricavabili dalla figura precedente.

Per piccole deformazioni:

$$\sin(2\pi x/a) \approx (2\pi x/a)$$

Il carico critico di taglio TEORICO, uguagliando (1) con (2), è:

$$\tau_{th} = (b/a) * G/(2\pi) \approx G/6.28 \quad (a \approx b)$$

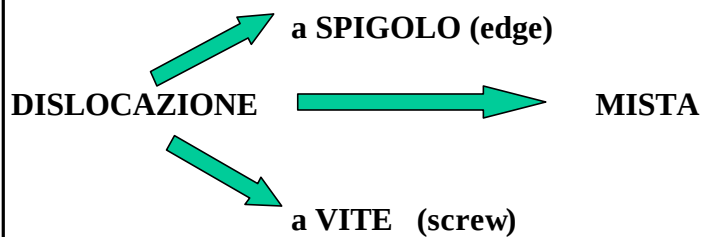
I valori trovati **SPERIMENTALMENTE** variano da **10^{-4} a $10^{-8} G$** .

$$G \approx 10^{11} \text{ dyn/cm}$$

35

I difetti lineari

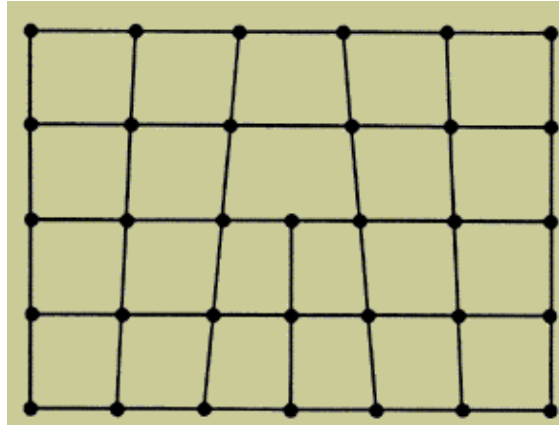
LE DISLOCAZIONI



36

I difetti lineari

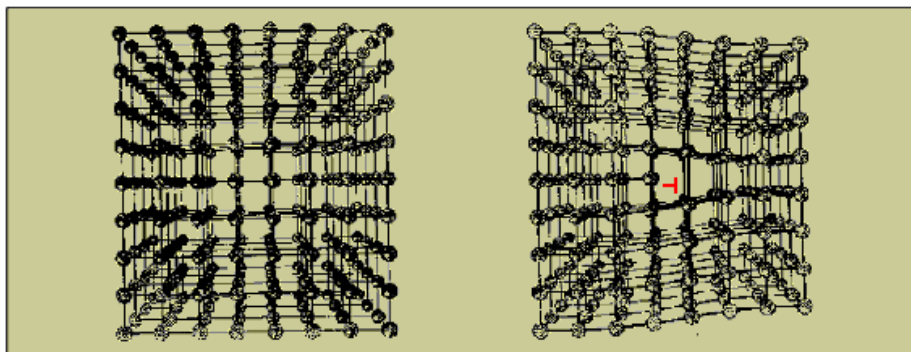
Dislocazioni a spigolo



37

I difetti lineari

Dislocazioni a spigolo

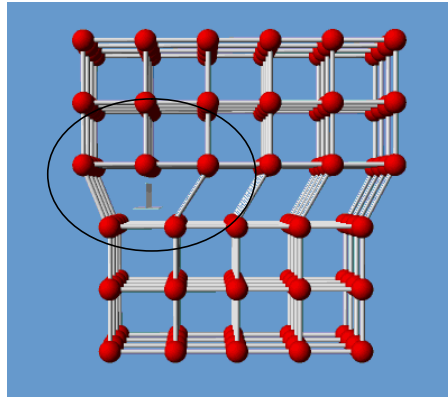


Il reticolo cubico semplice alla sinistra è perfetto. Alla destra contiene una dislocazione a spigolo indicata con il simbolo $\perp$; nella zona intorno all'esterno del semipiano estraneo, il reticolo è fortemente distorto.

38

I difetti lineari

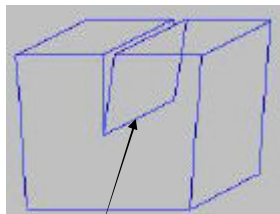
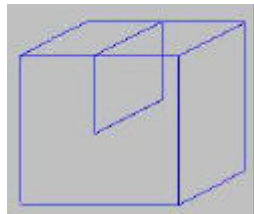
Dislocazioni a spigolo



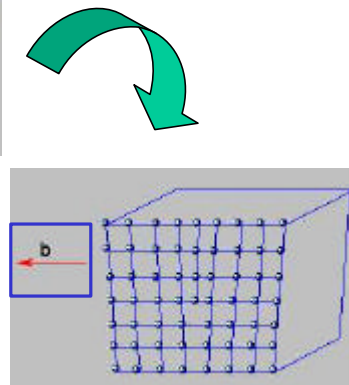
39

I difetti lineari

Dislocazione a spigolo



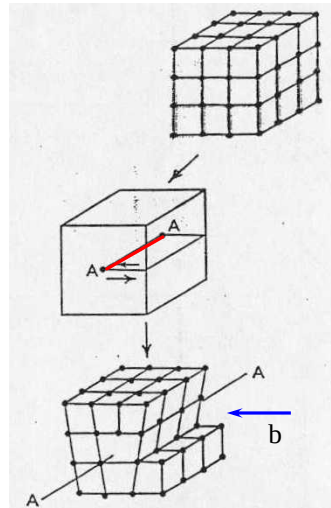
Linea di
dislocazione



40

I difetti lineari

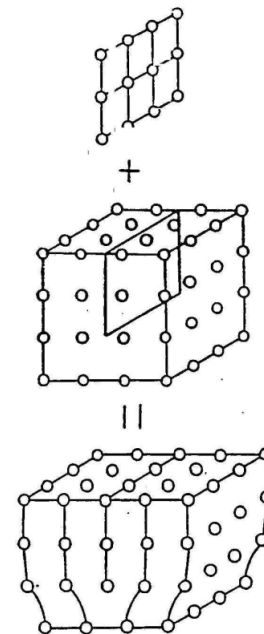
La dislocazione a spigolo è stata ottenuta operando un taglio nel cristallo e facendo successivamente scorrere le due superfici di taglio.



41

I difetti lineari

La dislocazione a spigolo è stata ottenuta operando un taglio nel cristallo ed inserendovi un semipiano atomico.

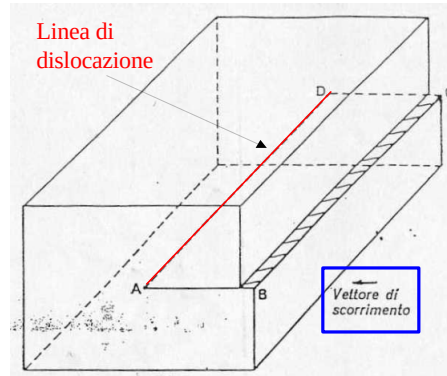


42

I difetti lineari

Dislocazione a spigolo

Nella dislocazione a spigolo si ha in una regione del cristallo un semipiano in più rispetto alla regione sottostante o soprastante che provoca uno spostamento positivo o negativo.

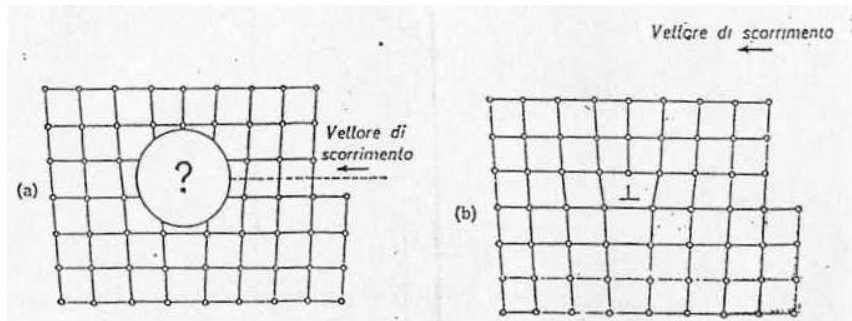


*Lo scorrimento ha avuto luogo sul piano ABCD
e il vettore di scorrimento, per la definizione di dislocazione a spigolo,
è **perpendicolare** alla linea di dislocazione AD.*

43

I difetti lineari

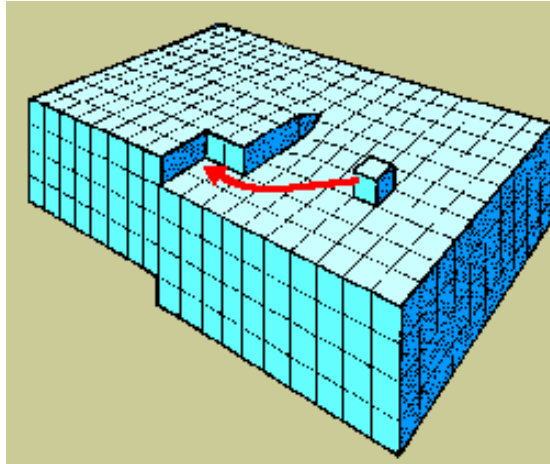
*Piano di atomi normale alla linea AD della figura precedente.
La dislocazione è una regione di disordine atomico (a), dove
gli atomi non sono circondati propriamente dai loro vicini;
(b) rappresenta la probabile distribuzione atomica
nell'intorno della dislocazione.*



44

I difetti lineari

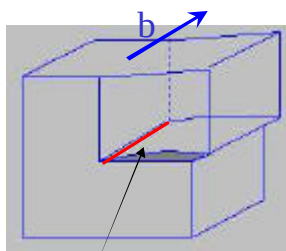
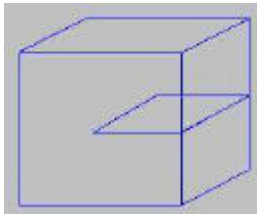
Dislocazioni a vite



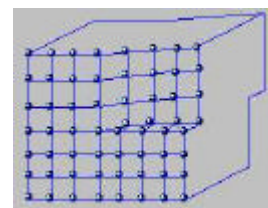
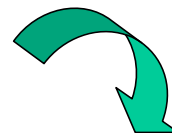
45

I difetti lineari

Dislocazione a vite

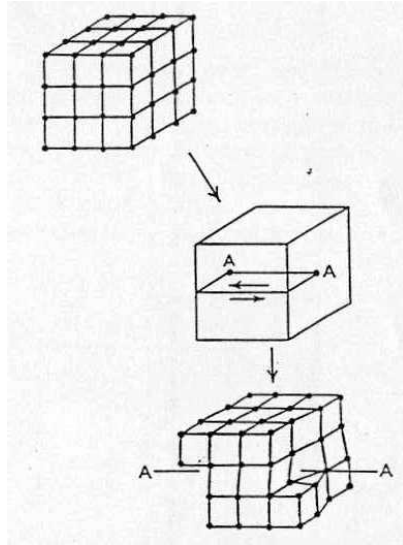


Linea di
dislocazione



46

I difetti lineari



Dislocazione a vite

La dislocazione a vite è stata ottenuta operando un taglio nel cristallo e facendo successivamente scorrere le due superfici di taglio. Si vede che lo scorrimento avviene in senso parallelo alla linea di dislocazione, diversamente dal caso a spigolo.

47

I difetti lineari

Dislocazione a vite

Nella dislocazione a vite lo spostamento di una parte del cristallo rispetto all'altra avviene con la formazione di una superficie elicoidale.

Guardando la linea di dislocazione verso il basso, se l'elica avanza in senso orario abbiamo la dislocazione a vite DESTROGIRA viceversa LEVOGIRA

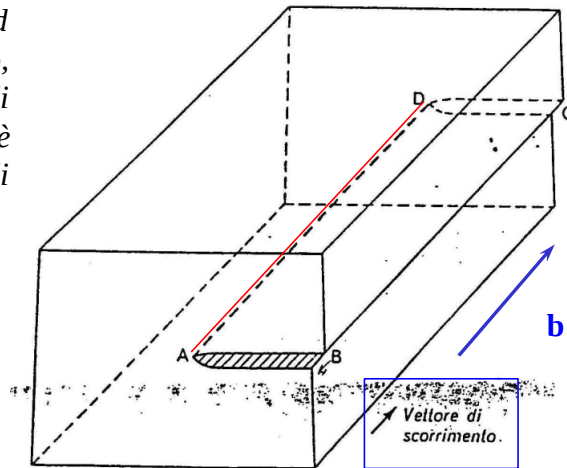
Dislocazione a spigolo

**POSITIVA $\wedge$
NEGATIVA $\vee$**

48

I difetti lineari

Lo scorrimento ha avuto luogo sul piano ABCD ed il vettore di scorrimento, per la definizione di dislocazione a vite, è parallelo alla linea di dislocazione AD.



49

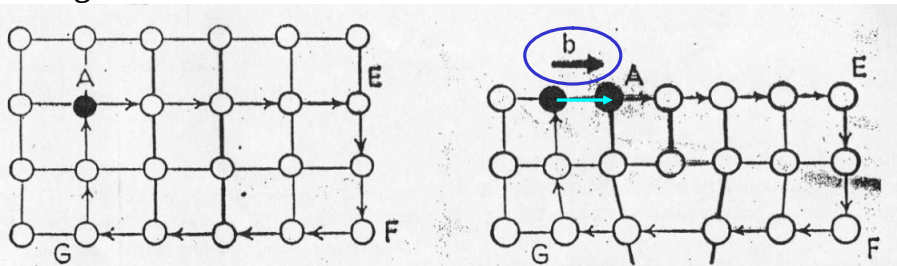
I difetti lineari

ETTORE DI BURGERS

Si consideri ad esempio, il cammino chiuso AEFGA nel cristallo perfetto:

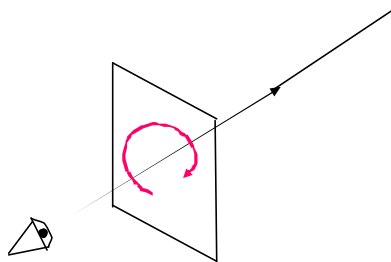
il corrispondente circuito nel cristallo imperfetto non chiuderà.

Il vettore **b** che si deve aggiungere, affinché il circuito sia chiuso, è il **vettore di BURGERS** ed il circuito AEFGA è il **circuito di Burgers**.

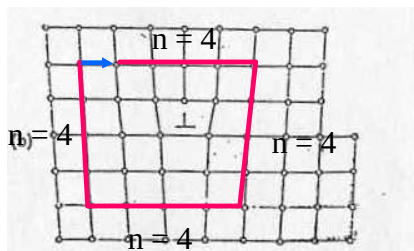


Circuito di Burgers nell'intorno di una dislocazione a spigolo.

50



1. Fisso un verso positivo (arbitrario) della linea di dislocazione
2. Individuo un piano ad essa perpendicolare del reticolo cristallino
3. Traccio un percorso attorno alla linea di dislocazione muovendo n volte il parametro reticolare nelle 4 direzioni perpendicolari fra loro in senso orario guardando la dislocazione nel verso positivo



51

I difetti lineari

Il circuito di Burgers deve essere percorso in **senso orario** per ottenere la direzione del vettore.

Rovesciando il senso del percorso si rovescia ovviamente la direzione del vettore.

In un reticolo SC il vettore di Burgers è il più corto vettore di traslazione del reticolo che congiunge due punti nel reticolo stesso.

Dislocazione unitaria è la dislocazione il cui vettore di Burgers è pari al vettore di traslazione del reticolo in una direzione.

52

I difetti lineari

Nella dislocazione a *spigolo* il vettore **b** è *perpendicolare* alla linea della dislocazione.

Nella dislocazione a *vite* il vettore **b** è *parallelo* alla linea della dislocazione.

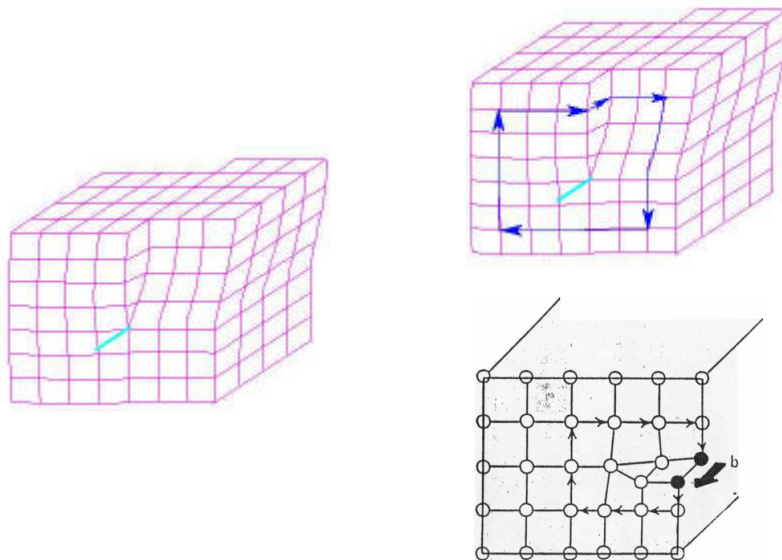
Il segno del vettore di Burgers dipende dal verso, con il quale si percorre il circuito di Burgers che dipende dal verso lungo il quale si muove la dislocazione.

Scelta arbitrariamente la direzione positiva di avanzamento della dislocazione, il vettore **b** è definito come segue:

“se si percorre il circuito di Burgers nella direzione di rotazione di una vite destrorsa, che avanza lungo la dislocazione, il vettore è il tratto che si deve aggiungere per chiudere il circuito”.

53

I difetti lineari



54

I difetti lineari

Il vettore di Burgers di un circuito che racchiuda diverse dislocazioni è uguale alla somma dei vettori di Burgers delle dislocazioni.

$\mathbf{b}$ dipende dalla natura del materiale intorno alla dislocazione.

Le dislocazioni sono in realtà piegate ed irregolari specie dopo deformazione plastica. Il bordo che separa la parte che ha subito lo scorrimento dalla parte indeformata è curvo

55

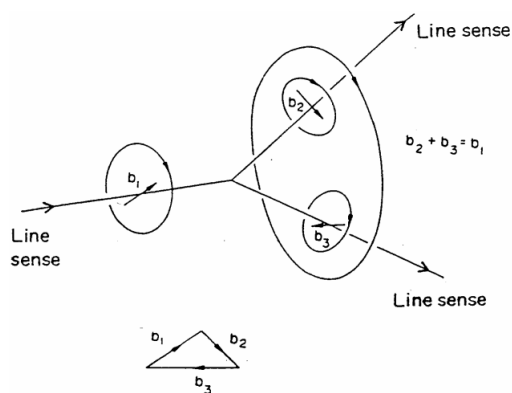
I difetti lineari

Le linee di dislocazione che finiscono in un **nodo** (punto di incontro) di due o più dislocazioni rispettano il **principio conservativo per il vettore di Burgers**.

$$\sum \mathbf{b}_i = 0$$

Tre dislocazioni formanti un nodo.

$$\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 + \mathbf{b}_3 = 0$$



56

I difetti lineari

Tutti i cristalli ad eccezione di qualche Whisker presentano delle dislocazioni.

La **densità di dislocazione** è l'unità di misura per la definizione numerica di tale difetto. Si ha la **densità in volume**

$$\rho_v = \frac{\text{lunghezza totale delle linee di dislocazione}}{\text{unità di volume del cristallo}} = \frac{\text{mm}}{\text{mm}^3}$$

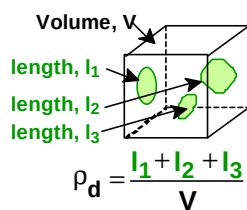
si ha anche la **densità per area** ossia numero di dislocazioni che intersecano l'unità di area

$\rho_s = \text{unità/mm}^2$

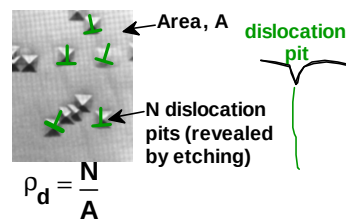
- se tutte le dislocazioni fossero parallele $\rho_s = \rho_v$
- in una distribuzione casuale $\rho_s \gg \rho_v$
- nel **cristallo ricotto** $\rho = 10^4 - 10^6 \text{ mm}^{-2}$
- **deformato a freddo** $\rho = 10^8 - 10^9 \text{ mm}^{-2}$

57

Misura della densità delle dislocazioni



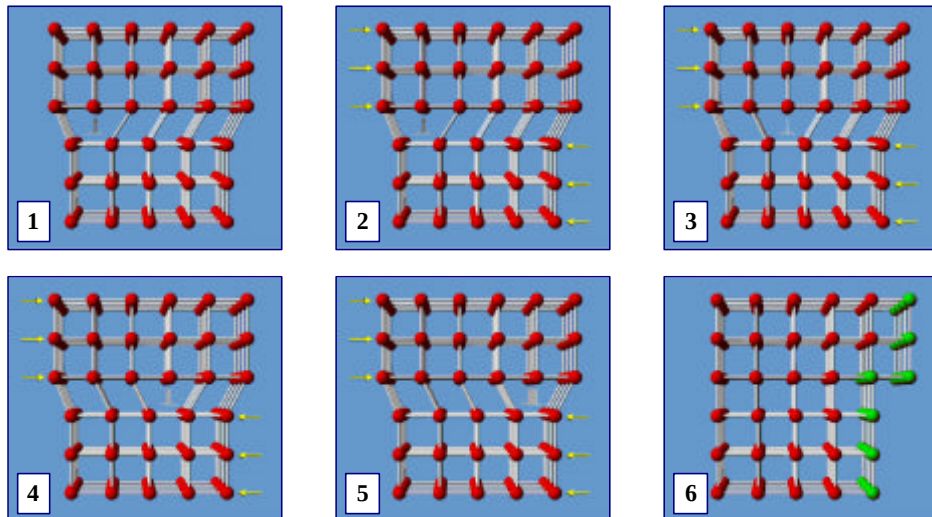
O



58

I difetti lineari

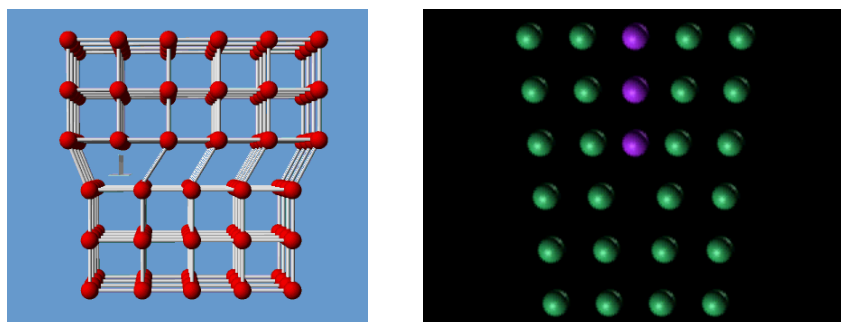
Dislocazioni e deformazione plastica



59

I difetti lineari

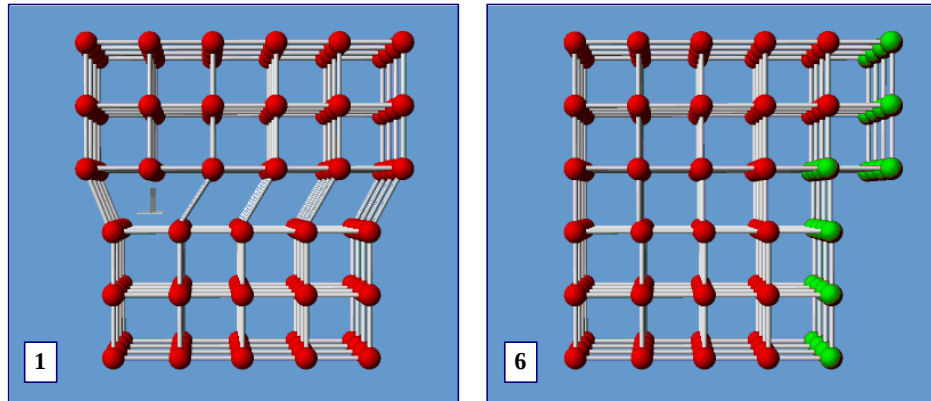
Dislocazioni e deformazione plastica



60

I difetti lineari

Dislocazioni e deformazione plastica



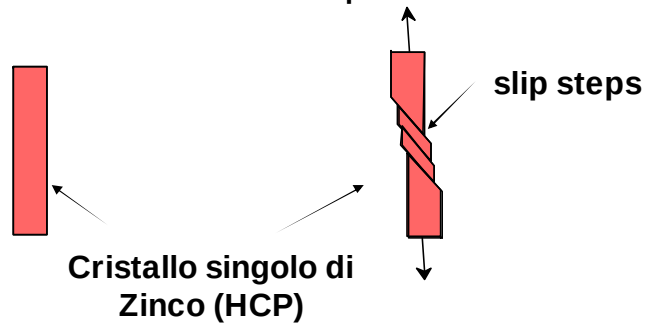
61

I difetti lineari

Dislocazioni:

- sono difetti lineari,
- il loro moto causa lo scorrimento fra piani cristallini,
- produce deformazione plastica permanente.

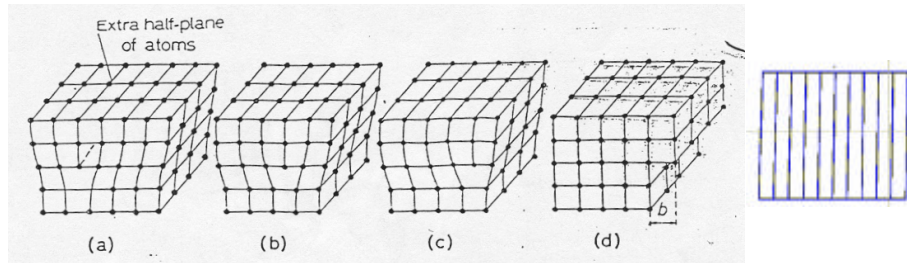
- Prima della deformazione • dopo deformazione



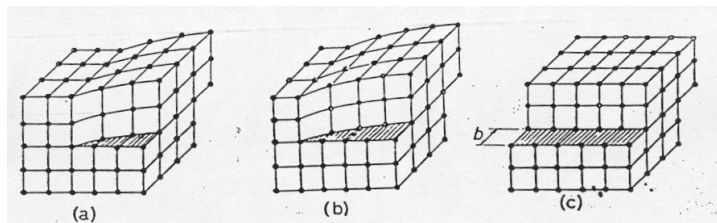
62

I difetti lineari

Movimento di una dislocazione a spigolo.



Movimento di una dislocazione a vite.



63

I difetti lineari

Movimento delle dislocazioni

- Il **piano di scorrimento** delle dislocazioni è quello a **più alta densità atomica**
- La **direzione di scorrimento** corrisponde a quella che nel piano di scorrimento ha gli **atomi più vicini**.

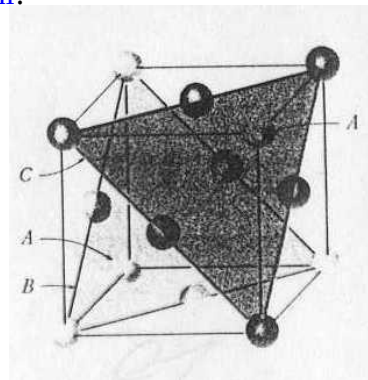
FCC

- sulla famiglia dei piani 111

- nelle direzioni $\langle 110 \rangle$

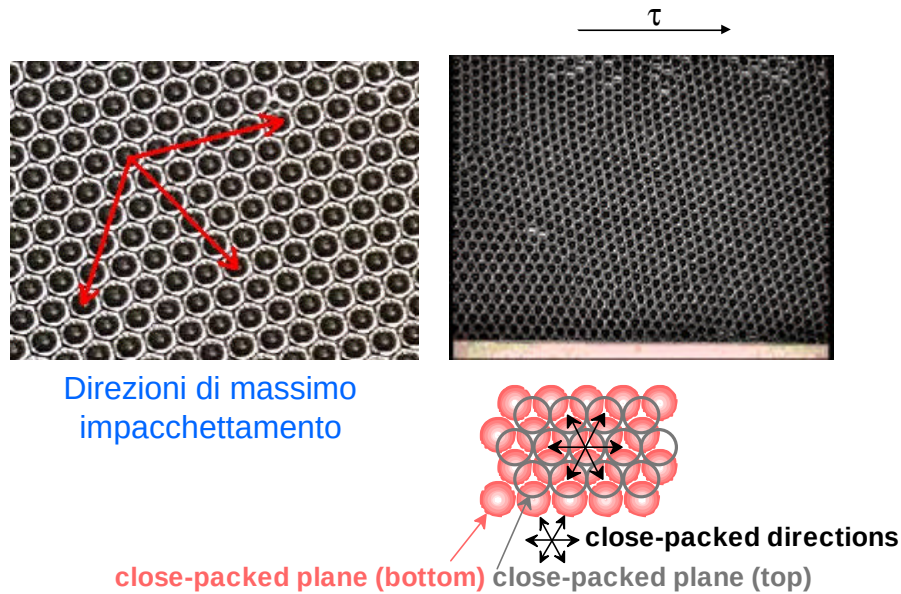
BCC

- direzione $\langle 111 \rangle$



64

I difetti lineari

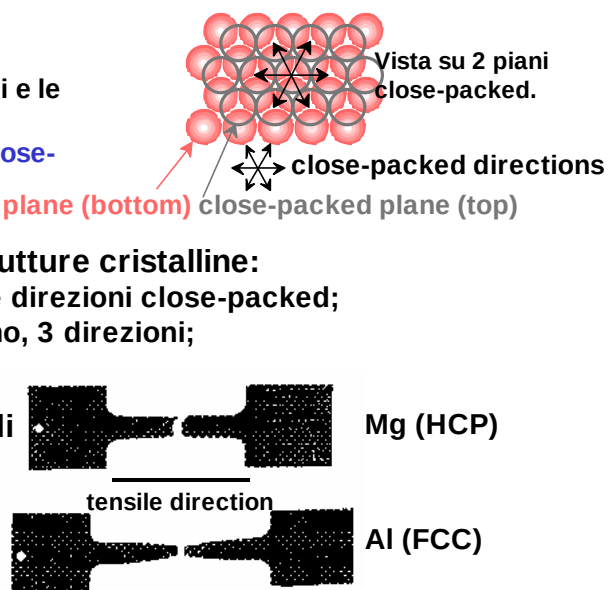


DISLOCAZIONI & STRUTTURA CRISTALLINA

- **Struttura:**
sono preferiti i piani e le direzioni a massimo impacchettamento (**close-packed**).

- **Confronto fra strutture cristalline:**
FCC: molti piani e direzioni close-packed;
HCP: solo un piano, 3 direzioni;
BCC: nessuno

- **risultati del test di trazione.**



I difetti lineari

Nella dislocazione a *spigolo* il **vettore di Burgers** e la **linea di dislocazione** individuano il piano di scorrimento.

Nella dislocazione a *vite* questo non avviene poiché i due parametri non individuano univocamente il piano di scorrimento. Una linea e un vettore ad essa parallela individuano **infiniti piani** passanti per la linea di dislocazione stessa.

67

I difetti lineari

LO SCORRIMENTO (SLIP)

Vi sono due tipi di movimento delle dislocazioni

•**GLIDE** o Movimento conservativo

La dislocazione si muove sulla superficie che contiene sia la linea di dislocazione sia il vettore di Burgers

•**CLIMB** o Movimento non conservativo

La dislocazione si muove fuori dalla superficie di scorrimento normale al vettore di Burgers.

“Un piano ed una direzione di scorrimento costituiscono un sistema di scorrimento”.

68

I difetti lineari

Il **Glide** di molte dislocazione dà come risultato lo scorrimento (**slip**) che è la più comune manifestazione della deformazione plastica e può essere interpretata come lo **scorrimento o lo spostamento di un piano di atomi su di un altro**.

Tra i piani di scorrimento rimane una parte di cristallo indeformata.

A basse temperature quando la diffusione è difficile per i difetti puntiformi il movimento delle dislocazioni è conservativo (**GLIDE**); a più alte temperature si avrà anche il processo di tipo non conservativo (**CLIMB**), che permette ad una dislocazione a spigolo di muoversi fuori dal suo piano mediante interazione con i difetti puntiformi.

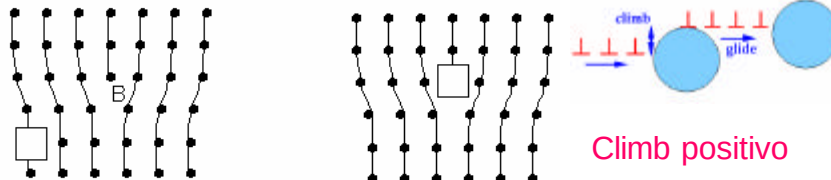
Si ha **Climb positivo** se la linea di dislocazione si muove in su di uno spazio interatomico.

69

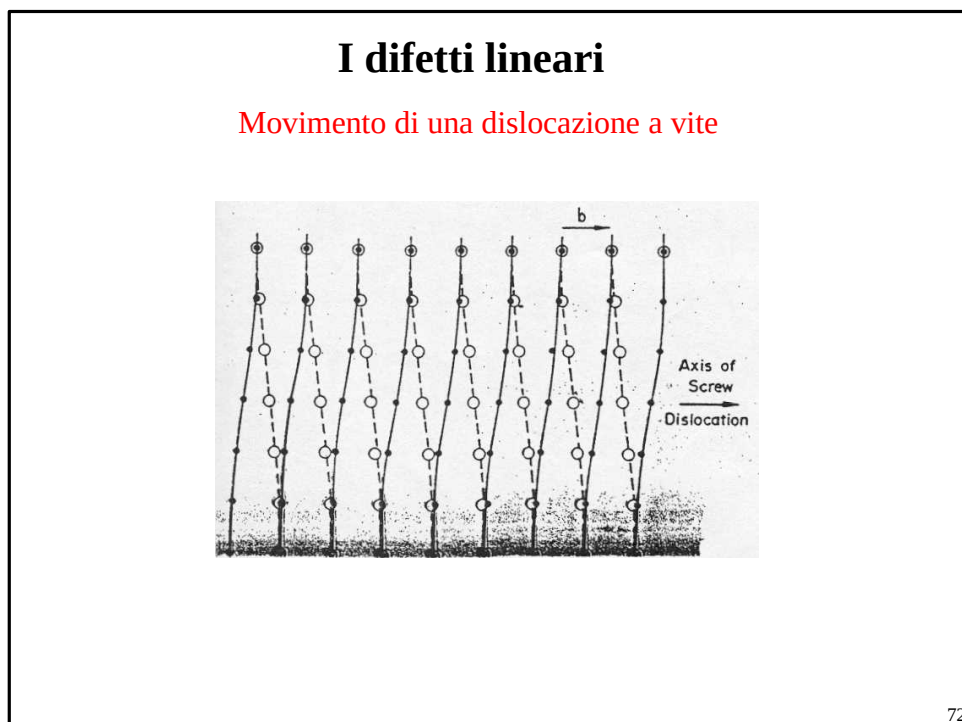
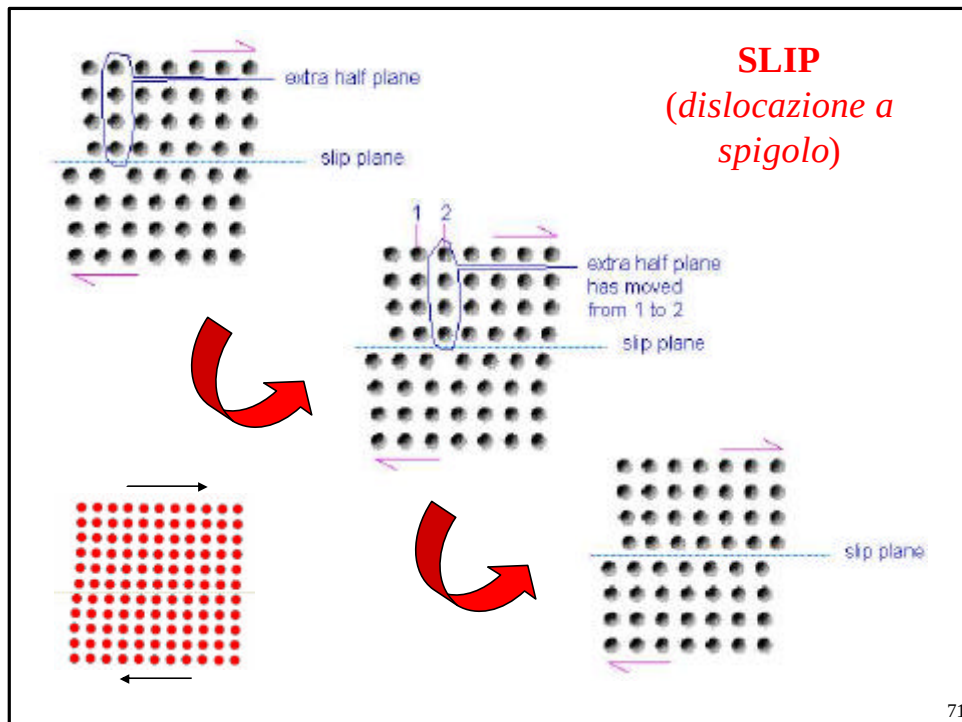
I difetti lineari

Si ha **Climb negativo** se è introdotta una fila di atomi al disotto della linea di dislocazione

Questo processo avviene con trasporto di massa per cui è necessaria **l'attivazione termica**. Il più comune processo di climb è legato alla diffusione di vacanze.



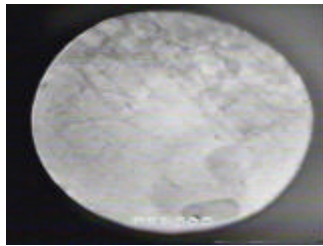
70



I difetti lineari

Osservazione sperimentale delle dislocazioni

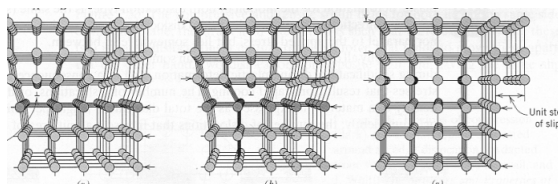
Movimento ad alta temperatura su acciaio ferritico (BCC)
(osservazioni ottenute con microscopio a trasmissione elettronica e
tavolino riscaldante)



73

Moto delle dislocazioni

- Produce deformazione plastica,
- Dipende dalla rottura sequenziale dei legami atomici



- Se le dislocazioni non si muovono, la defoemazione plastica non avviene!



Monocristallo di Zn deformato plasticamente



74

I difetti lineari

Supponiamo di applicare ad un corpo di area A una forza F normale alla superficie A

sul piano A_0 tale forza dà origine ad un carico tangenziale τ dove

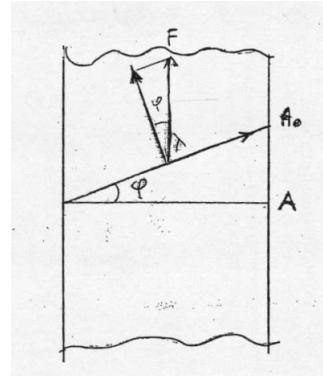
$$\tau = (F \cos l) / A_0$$

$$A_0 \cos \phi = A$$

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

$$= F/A \cos l \cos \phi$$

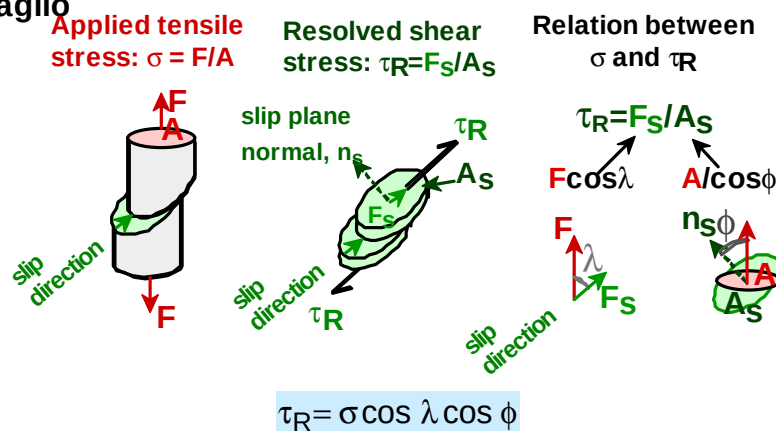
$$\cos l \cos \phi = \text{Fattore di SCHMID}$$



75

Tensione e moto delle dislocazioni

- Scorrimento del cristallo dovuto alla **tensione di taglio risolta**, τ_R .
- Una tensione applicata può produrre un tale sforzo di taglio



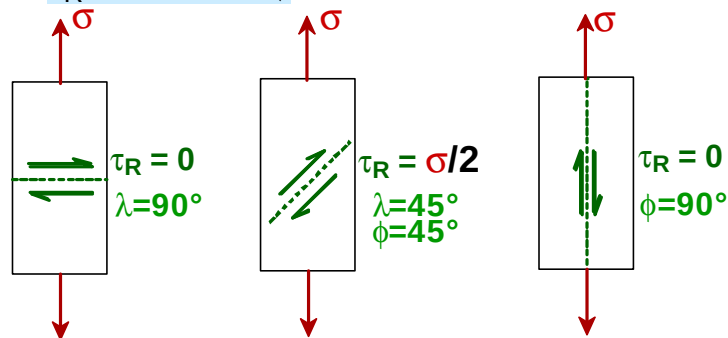
76

CRITICAL RESOLVED SHEAR STRESS

- Condizione per il moto delle dislocazioni $\tau_R > \tau_{CRSS}$
- Orientazione del cristallo può rendere più facile o difficile il moto delle dislocazioni

typically
 $10^{-4}G$ to $10^{-2}G$

$$\tau_R = \sigma \cos \lambda \cos \phi$$



77

Moto delle disl. nei policristalli

- Piani & direzioni di scorrimento (λ, ϕ) cambiano da un cristallo all'altro.
- τ_R varierà da cristallo a cristallo.
- Il cristallo con il più alto valore di τ_R snerva per primo.
- Gli altri cristalli (meno favorevolmente orientati) snervano successivamente.



78

I difetti lineari

JOGS E KINKS

Jogs = gradini di dislocazione che si muovono da un piano di scorrimento ad un altro

Kinks = gradini **sullo stesso piano** di scorrimento

Entrambi sono elementi dislocazione con lo stesso vettore di Burgers della dislocazione originaria.

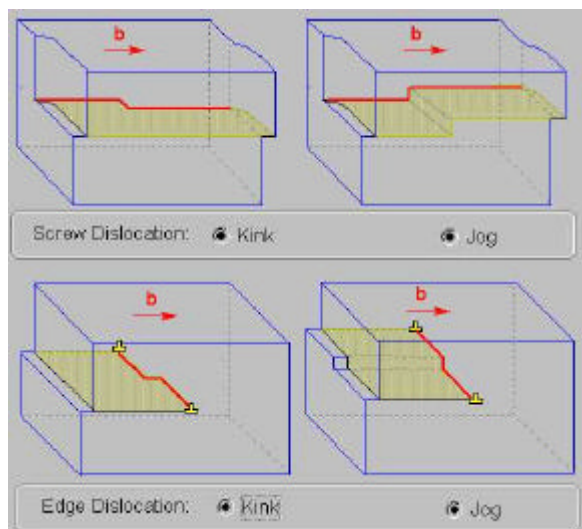
Il **KINK** avendo lo stesso piano di scorrimento della dislocazione **non** ne **impedisce il movimento**. La stessa cosa avviene per il Jog nella dislocazione a spigolo.

Nella dislocazione a vite con un **Jog** il movimento ad angolo retto richiede un **Climb**. Perchè il Jog si muova per Climb si deve avere formazione di difetti.

79

I difetti lineari

JOGS E KINKS

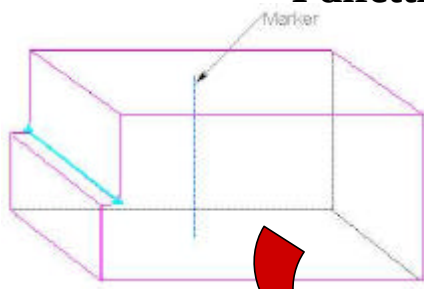


Si formano durante la solidificazione e raffreddamento per accumulo di vacanze

o per interazione con altre dislocazioni

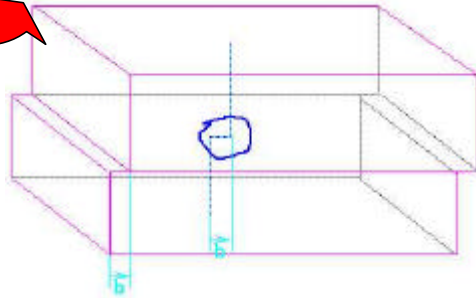
80

I difetti lineari



Formazione di un jog a seguito di un movimento di "glide".

Il marcatore può essere visto anche come una seconda dislocazione. Si vede così come l'incontro con la prima abbia creato su di esso un gradino (jog) pari al modulo di b .

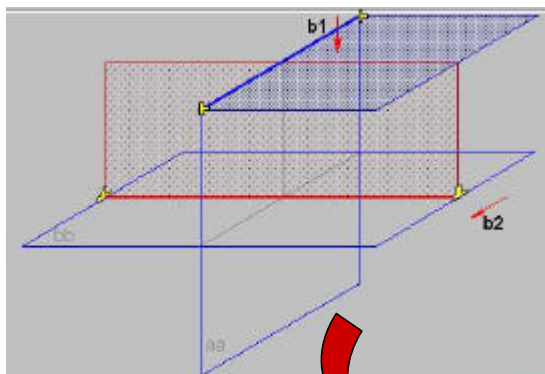


81

I difetti lineari

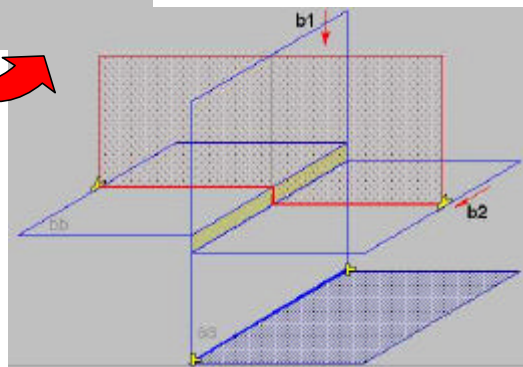
INTERAZIONE TRA DISLOCAZIONI
PERPENDICOLARI

82

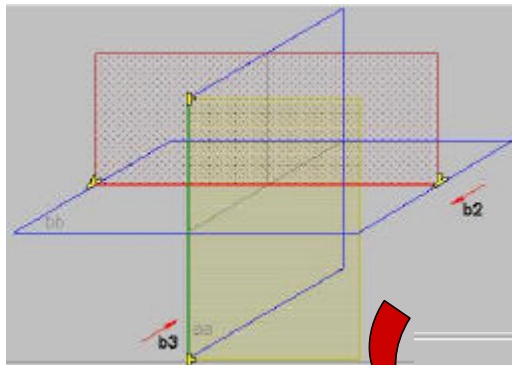


Formazione di Jogs: due dislocazioni a spigolo con vettori di Burgers perpendicolari.

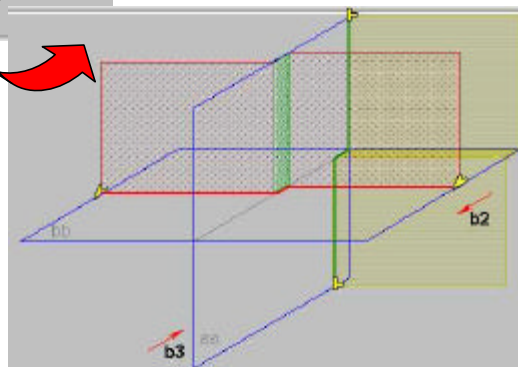
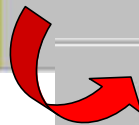
Il risultato è un jog che appartiene alla dislocazione 2, ma ha lunghezza pari al modulo di b_1 . Cioè la dislocazione 2 è aumentata di b_1 in lunghezza.

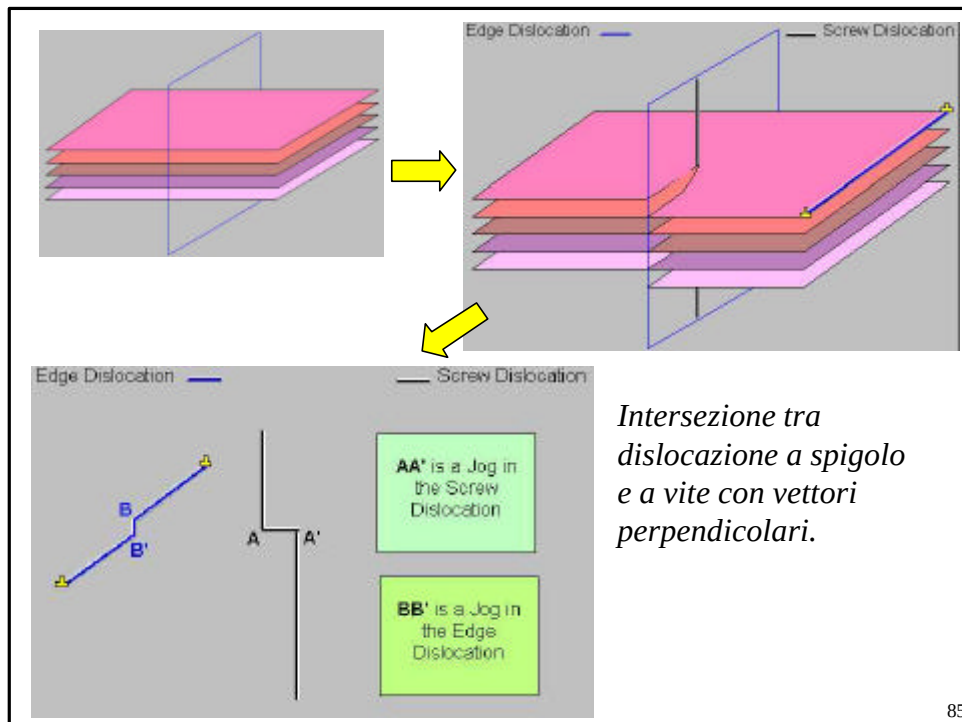


83

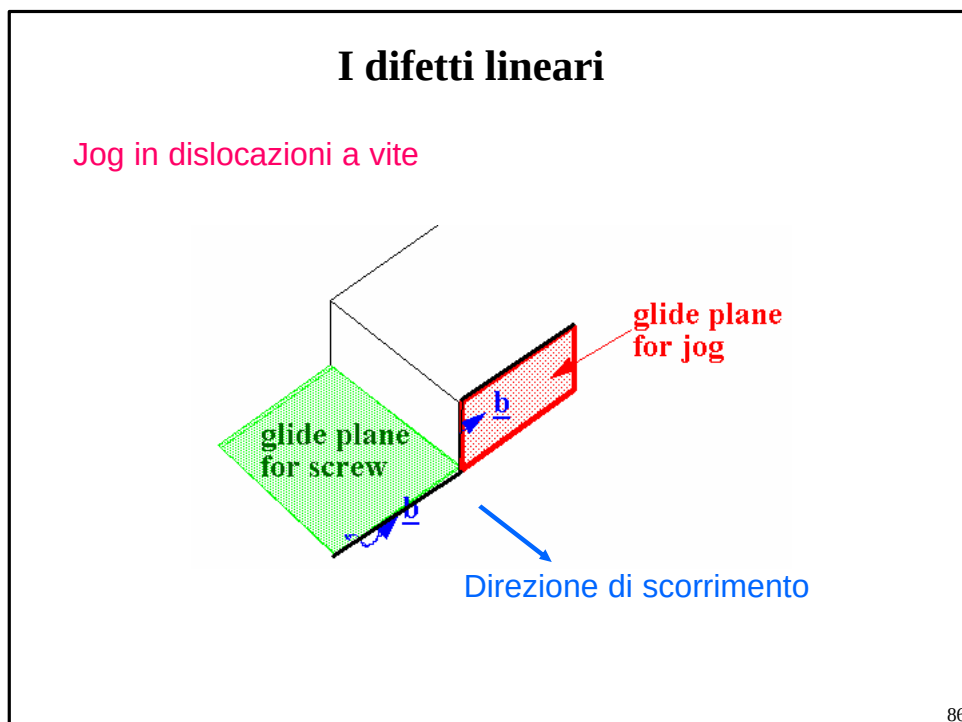


Formazione di Jogs: due dislocazioni a spigolo con vettori di Burgers paralleli.





85



86

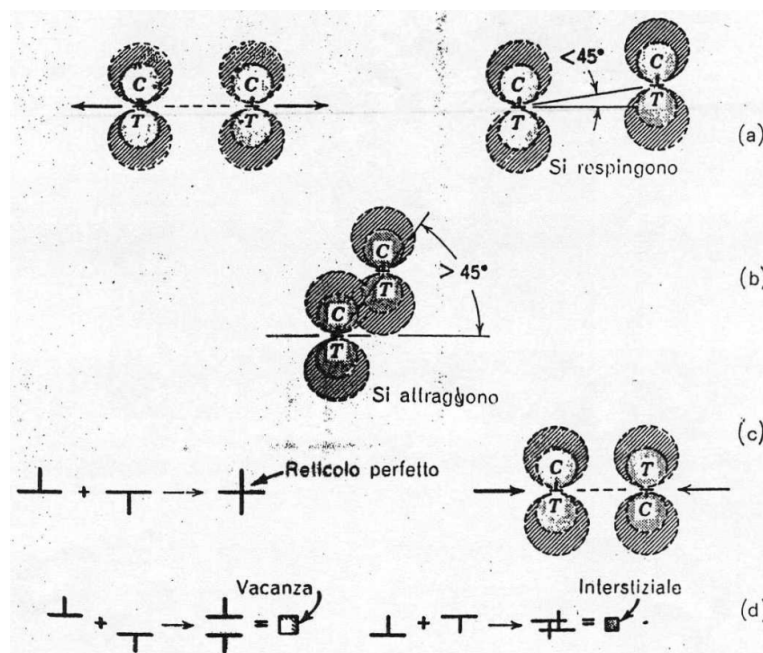
I difetti lineari

INTERAZIONI TRA DISLOCAZIONI PARALLELE

- 1) dislocazioni concordi in segno sullo stesso piano o su piani poco diversi con angolo tra direzione di scorrimento e normale che la interseca **< di 45°** si respingono
- 2) dislocazioni concordi di segno su piani molto diversi tra loro (angolo $> 45^\circ$) si attraggono
- 3) dislocazioni discordi in segno sullo stesso piano si attraggono ripristinando il reticolo perfetto
- 4) dislocazioni discordi in segno su piani adiacenti si annullano lasciando vacanze o interstiziali.

87

Interazione tra dislocazioni parallele : compressione e trazione.



88

I difetti lineari

OSTACOLI AL MOVIMENTO DELLE DISLOCAZIONI

Gli atomi estranei in una soluzione solida per rendere minima l'energia nella lega devono:

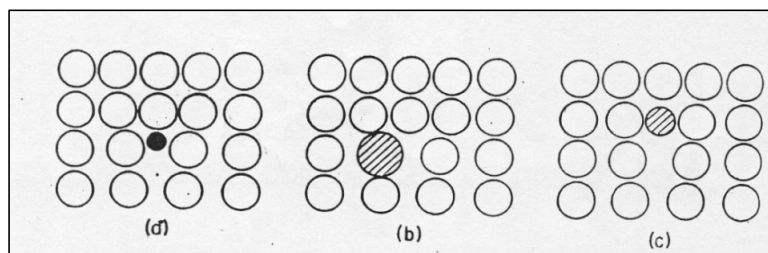
- se sono atomi **sostituzionali** di dimensioni **maggiori** del solvente, migrare verso la zona **dilatata**
- se sono **atomi sostituzionali** di dimensioni **minori** del solvente, migrare verso la zona **compressa**
- se sono **atomi interstiziali**, disporsi nella **zona dilatata**.

Intorno alla dislocazione si crea quindi una zona di addensamento di atomi estranei chiamata "**ATMOSFERA di COTTREL**" che esercita una azione di **ancoraggio** della dislocazione cioè ne rende difficile lo scorrimento.

89

I difetti lineari

OSTACOLI AL MOVIMENTO DELLE DISLOCAZIONI



Posizioni energeticamente favorevoli in una dislocazione lineare positiva per : a) atomi interstiziali; b) atomi sostituzionali più grandi; c) atomi sostituzionali più piccoli.

90

I difetti lineari

MODALITA' DI SUPERAMENTO DEGLI OSTACOLI

Quando una dislocazione, mossa da uno sforzo di taglio, nel suo scorrimento lungo un certo piano incontra delle particelle di una fase diversa dalla matrice può comportarsi in uno o più dei seguenti modi:

- 1) se le particelle sono due o più e se la dislocazione è lineare, può sdoppiarsi in dislocazioni anulari che avvolgono le particelle ed in una rettilinea che prosegue oltre l'ostacolo (**OROWAN**)
- 2) la dislocazione può superare per "salto"

91

I difetti lineari

MODALITA' DI SUPERAMENTO DEGLI OSTACOLI

3) la dislocazione può slittare su un piano di scorrimento superiore o inferiore ma parallelo al primo (**cross slip**). Tale movimento richiede meno energia di quello per scalata per cui la dislocazione a vite è più mobile di quella a spigolo)

4) la dislocazione può attraversare la particella **tagliandola** (questo meccanismo prevede una **coerenza tra particella e matrice**)

5) la dislocazione si ferma sull'ostacolo senza superarlo e si crea in questa zona un **accumulo di dislocazioni**

92

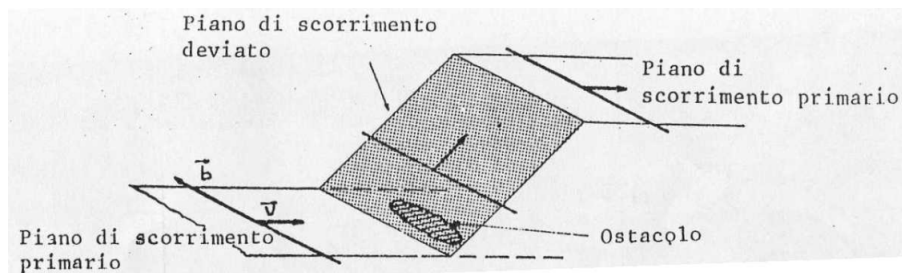
I difetti lineari

MODALITA' DI SUPERAMENTO DEGLI OSTACOLI

Tra tutte le possibilità verrà scelta quella che offre minore resistenza e che dipende :

- dalla natura, forma e dimensioni delle due fasi
- dalla temperatura
- dallo sforzo di taglio applicato.

Scorrimento deviato di una dislocazione a vite.



93

I difetti lineari

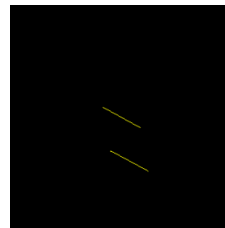
CROSS SLIP

In generale le **dislocazioni a vite** tendono a muoversi lungo certi piani cristallini .

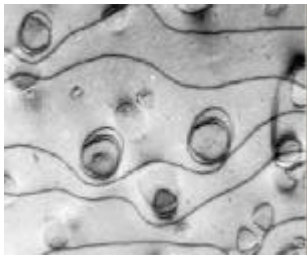
Nei metalli FCC la dislocazione a vite si muove lungo i piani $\{111\}$, ma può passare da uno all'altro piano della famiglia $\{111\}$.

Il cross slip di dislocazioni in movimento è visibile al TEM perché lascia una traccia che sbiadisce lentamente.

Nei metalli BCC il piano di scorrimento è meno definito e la dislocazione a vite vaga da un piano all'altro producendo linee di scorrimento ondegianti.



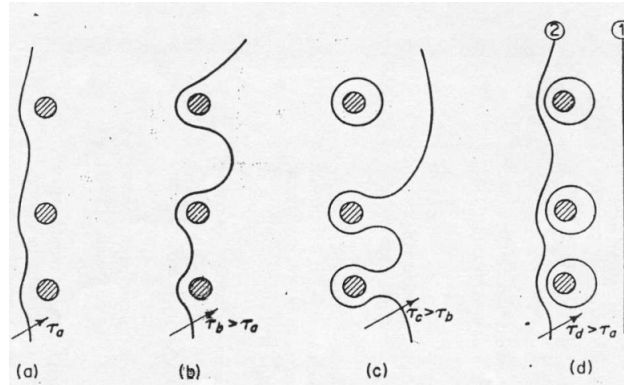
94



I difetti lineari

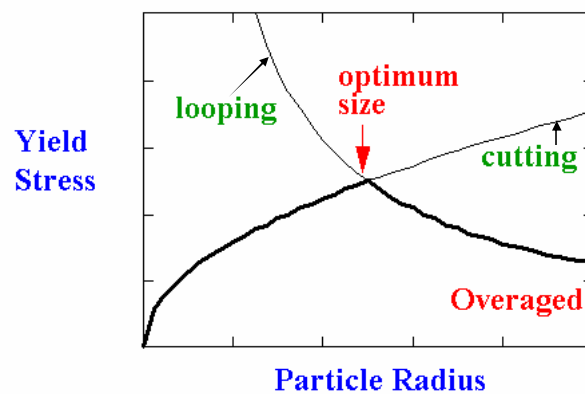
Modello di Orowan.

Interazione tra una dislocazione lineare e particelle di precipitato.



95

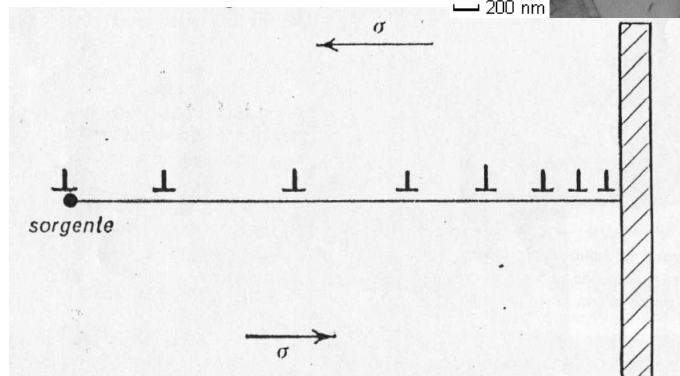
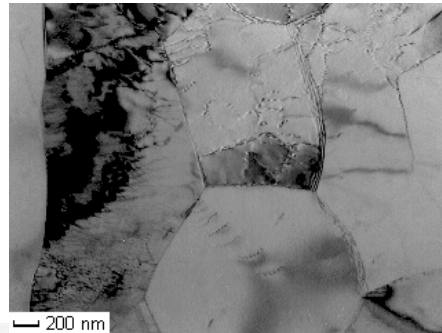
I difetti lineari



96

I difetti lineari

Accumulo di dislocazioni contro un ostacolo. Questo impilamento può bloccare un meccanismo continuo come il F.R.



97

I difetti lineari

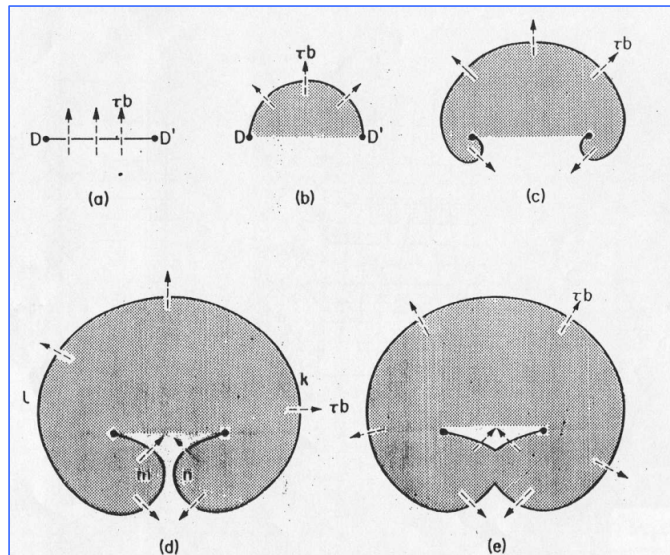
GENESI DELLE DISLOCAZIONI

- a) Durante la formazione dei germi (**passaggio liquido-solido**) si formano delle **zone difettose**
- b) durante il **raffreddamento** si avrebbe **l'accumulo di vacanze** in certe zone che darebbero luogo alle dislocazioni
- c) sulle superfici interne di materiali sia omogenei che polifasici. Ex. Nel primo caso sono sufficienti i **giunti dei grani**, nel secondo sono le superfici di separazione della matrice e le fasi (tra loro incoerenti) a giocare il ruolo predominante
- d) **meccanismo di FRANK-READ** detta anche sorgente di F.R.. Il funzionamento continuo di tale sorgente può essere interrotto dall'impilamento delle dislocazioni contro un ostacolo

98

GENESI DELLE DISLOCAZIONI

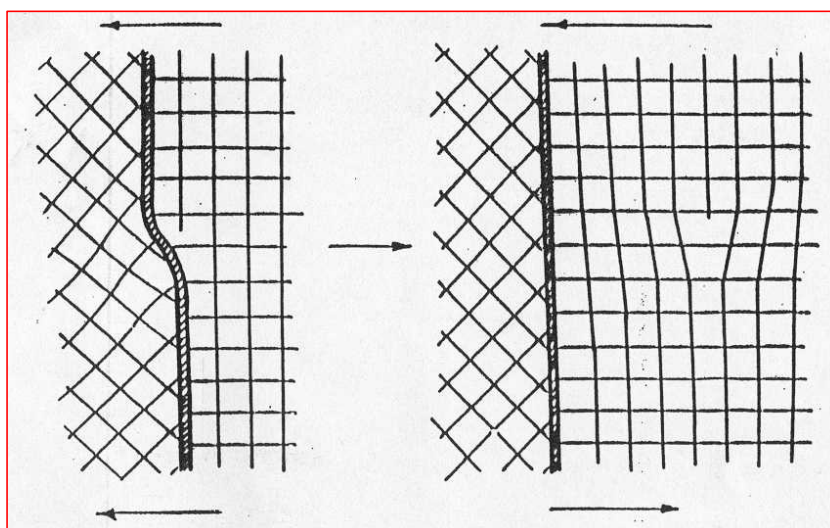
Sorgente di Frank-Read



99

GENESI DELLE DISLOCAZIONI

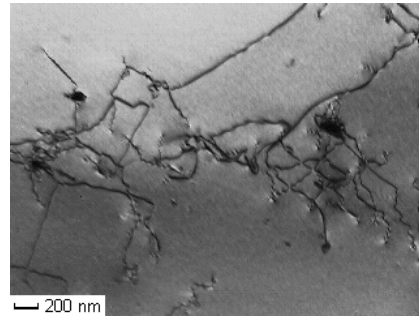
Emissione di una dislocazione al bordo del grano



100

I difetti lineari

RETE DI DISLOCAZIONI



Anche nei cristalli ricotti si ha che ogni piano di scorrimento sarà infilato da numerose dislocazioni. Le dislocazioni che attraversano il piano formano una **"FOREST DISLOCATIONS"** e le dislocazioni che si muovono sul piano di scorrimento intersecano le dislocazioni che infilano il piano.

Al procedere della deformazione plastica lo scorrimento avviene su altri sistemi di scorrimento ed aumentano il numero delle dislocazioni a foresta.

Il cristallo incrudisce e si deforma

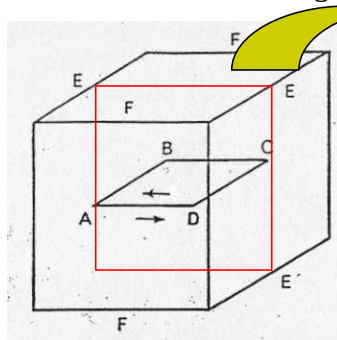
101

I difetti lineari

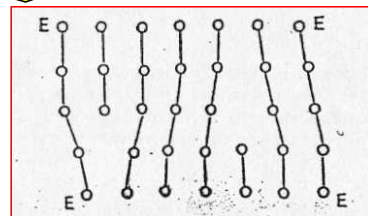
ANELLO DI DISLOCAZIONI

All'interno di un piano di scorrimento vengono a trovarsi contemporaneamente due dislocazioni a spigolo di segno opposto e due a vite sempre di segno opposto.

Come è evidente dalla figura si forma un anello.



Anello di dislocazione. La dislocazione forma una linea chiusa ABCD.



Sezione lungo il piano EEEE.

102