

DEFORMAZIONE

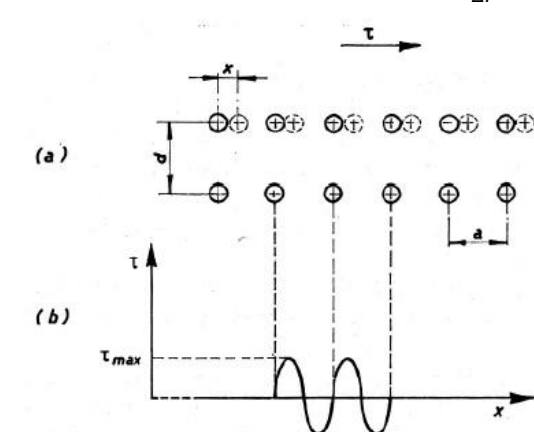
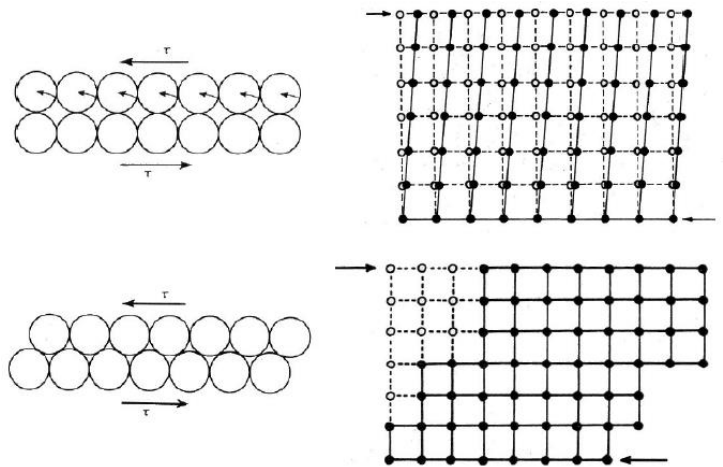
Deformazione elastica e plastica

Un materiale sottoposto a trazione mediante forze F si allungherà così da avere una lunghezza iniziale l_0 diversa dalla lunghezza finale l . Si definisce deformazione, ε , il rapporto tra l'allungamento subito dal corpo e la lunghezza iniziale: $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$. Nel materiale la variazione della dimensione finale e dunque la deformazione stessa è composta da due componenti:

1. Deformazione elastica = cambia la forma del componente se sottoposto a una sollecitazione ma nel momento in cui il carico è rimosso la forma viene recuperata. Non è dunque una deformazione permanente. Da un punto di vista microscopico tale deformazione è uno spostamento reversibile degli atomi del reticolo dalle posizioni di equilibrio. Gli atomi si spostano lungo le direzioni reticolari ma senza rompere i legami.
2. Deformazione plastica = deformazione che è permanente. C'è una componente della deformazione che non è completamente recuperata una volta che si toglie la forza applicata. Da un punto di vista microscopico in tale deformazione avviene una rottura dei legami interatomici; gli atomi si spostano lungo le direzioni reticolari rompendo i legami e creandone di nuovi. È dunque uno spostamento irreversibile.

La deformazione del materiale almeno per quanto riguarda la parte elastica è legata all'energia di legame. Se ho un'energia elevata gli atomi non si sposteranno altrimenti si sposteranno un po'.

Considerando la deformazione elastica è possibile notare una proporzionalità diretta tra lo sforzo applicato e la deformazione prodotta definita tramite la legge di Hooke: $\sigma = E * \varepsilon$. Dove E è il modulo di Young o modulo elastico del metallico e indica una delle proprietà fondamentali di un materiale. Un elevato valore di E significa un'elevata rigidità del materiale. Questo modulo è proporzionale alla frazione $\frac{\Delta F}{\Delta r}$.



deformazione plastica se viene superato un determinato limite che può essere calcolato come: $\tau_{max} = \frac{G a}{2 \pi d}$ con a = distanza orizzontale tra due atomi, d = distanza verticale tra due atomi e G = energia di legame.

Esiste un difetto che permette di deformare plasticamente un materiale molto più facilmente di quanto penseremmo e di quanto otterremo a partire dalla formula (i valori ottenuti differiscono di ben 3 ordini di grandezza); questo difetto è un difetto di linea e si chiama dislocazione. Tali difetti

consentono di deformare plasticamente il materiale utilizzando un'energia ordini di grandezza inferiori di quella ottenuta ipotizzando di dover rompere tutti i legami.

Difetti di linea: dislocazione

La dislocazione è un difetto lineare o monodimensionale intorno a cui gli atomi sono fuori posto rispetto alle posizioni che dovrebbero avere nel reticolo. Le dislocazioni sono dunque linee di imperfezioni nel cristallo introdotte durante la solidificazione o quando il materiale viene deformato permanentemente. Esistono due grandi famiglie in cui possono essere classificate le dislocazioni:

1. Dislocazione a spigolo = difetto lineare centrato intorno alla linea che viene definita all'estremità del semipiano aggiunto di atomi; nel materiale infatti è possibile trovare un semipiano aggiuntivo di atomi che non trovano una corrispondenza nell'altra parte simmetrica del cristallo. Questa linea è talvolta denominata asse della dislocazione e può assumere due diverse posizioni:

- \perp = segno positivo
- \parallel = segno negativo

2. Dislocazione a vite = dislocazione che si ottiene ruotando un materiale. Tale dislocazione deve il loro nome dal percorso a spirale o elicoidale o dalla rampa che deve percorrere girando sui piani atomi intorno all'asse della dislocazione. Queste dislocazioni possono essere designate con due simboli diversi:

- \perp = positive
- \parallel = negative

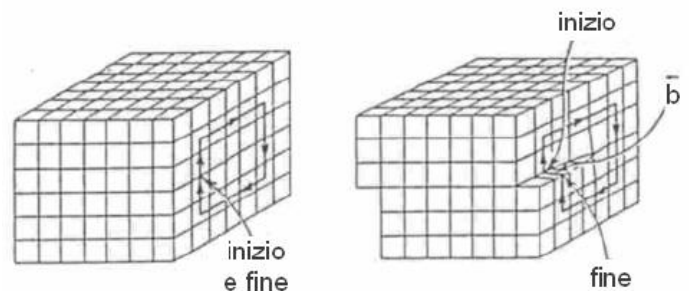
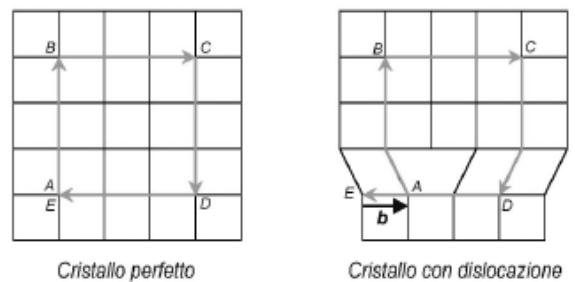
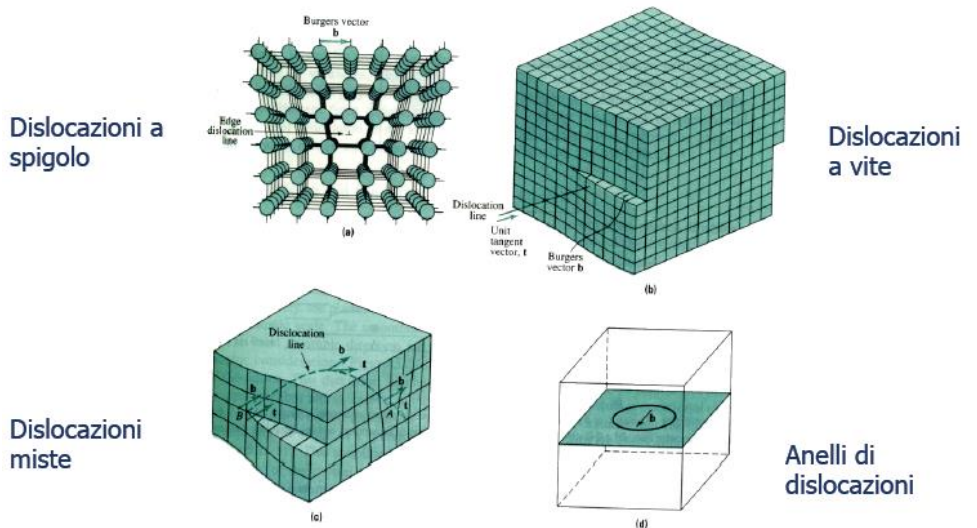
Più nello specifico è possibile suddividere ulteriormente i tipi di dislocazioni:

1. Spigolo
2. Vite
3. Miste
4. Anelli di dislocazione

Nel momento in cui il materiale viene sollecitato al taglio i legami dell'intorno di un punto si rompono e dalla seconda posizione il semipiano aggiuntivo passa alla terza posizione e così via fino a che la forma dell'oggetto non viene modificata in modo permanente. Il cambiamento di forma del materiale è dunque anche una conseguenza della presenza delle dislocazioni. Tramite la dislocazione è inoltre possibile giustificare perché la deformazione plastica può avvenire con una sollecitazione molto più bassa:

al posto di rompere i legami atomici di tutta la linea è sufficiente rompere i legami della linea di dislocazione. Il movimento delle dislocazioni quindi ostacola o facilita la deformazione plastica. Per capire come questi difetti possano influenzare la deformazione plastica è necessario associare alla dislocazione stessa un vettore che la possa descrivere così da poter ricavare una relazione matematica che descriva la relazione tra questi due fenomeni. Uno dei modi per realizzare tale associazione è la creazione di un ciclo di Burgers e associare dunque a ogni dislocazione un vettore detto vettore di Burgers. Il circuito si crea in modo tale che tenga presente l'effettiva presenza o meno della dislocazione stessa: il pezzettino che manca è il vettore che rappresenta la dislocazione. La lunghezza di questo vettore è la distanza interatomica quindi non è importante; è invece importante il verso e il segno (delimita semipiano superiore) positivo, (delimita semipiano inferiore) negativo. Esistono diversi tipi di interazioni tra diverse le dislocazioni:

1. Dislocazioni di segno uguale sullo stesso piano di slittamento si respingono
2. Dislocazioni di segno opposto sullo stesso piano di slittamento si attraggono, annullando la dislocazione e dando origine a un cristallo.
3. Se le dislocazioni di tipo diversi si incontrano si uniscono in nodi, quindi non si sommano, e non permettono la deformazione.



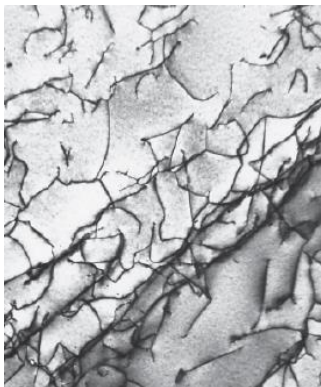
Movimenti delle dislocazioni

Le dislocazioni possono spostarsi all'interno di un reticolo se sottoposte a sforzi. Tale movimento avviene su un piano, detto di scorrimento del cristallo, che rappresenta il piano di massima compattazione e che è definito dal vettore di Burgers. In particolare le dislocazioni a spigolo si muovono parallelamente al vettore di Burgers mentre quelle a vite si muovono perpendicolarmente ad esso. Ogni struttura ha un piano di scorrimento specifico; in particolare il cubico facce centrate ha come piano di scorrimento e quindi come piano di massima compattazione quello della diagonale del cubo definito dagli indici di Miller come $\{1\ 1\ 1\}$. Le dislocazioni non possono terminare in mezzo al cristallo, ma solo sulla superficie o su altre dislocazioni. Esistono diversi tipi di movimenti:

1. Glide (dislocazioni a spigolo e vite) = scorrimento delle dislocazioni che provoca una deformazione plastica del materiale. Lo scorrimento avviene sui piani di massima compattazione.
2. Climb (dislocazioni a spigolo) = se la dislocazione non si trova sul piano di massima compattazione queste possono saltare di piano grazie alla sollecitazione termica o alla presenza reticolare di difetti di punto. L'interazione tra difetti di punto e dislocazione è quindi importante perché permette di aumentare la mobilità delle dislocazioni. Questo meccanismo per cui cambia il piano di dislocazione in inglese si chiama climb.
3. Cross slip (dislocazioni a vite) = cioè cambiamento di piano di scorrimento.

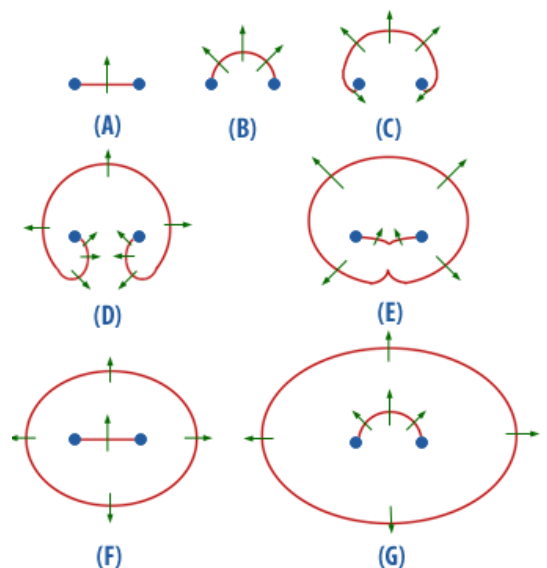
Possiamo associare alla dislocazione un campo di sforzi: se considero la dislocazione a vite avrò una torsione mentre per una dislocazione a spigolo avrò una trazione o una compressione.

Moltiplicazione delle dislocazioni



A partire dal 1950 con lo sviluppo della microscopia elettronica a trasmissione è stato possibile osservare queste dislocazioni. Proprio tramite l'ausilio del microscopio è stato possibile scoprire che il numero delle dislocazioni presenti, circa tra 10^4 e 10^6 effettivamente è in realtà molto più basso rispetto a quello che potrebbe giustificare una deformazione plastica cioè 10^{10} e 10^{11} . È vero dunque che le dislocazioni facilitano la deformazione plastica ma esiste anche un qualche meccanismo per cui la deformazione plastica comporta la formazione di dislocazioni: la deformazione plastica è perciò possibile grazie al movimento delle dislocazioni e nel contempo la deformazione porta alla formazione di altre dislocazioni. Il meccanismo più probabile che rispecchia questa teoria è quello di Frank e Read. Quindi in conclusione le tre condizioni necessarie affinché da una dislocazione nascano più dislocazioni sono:

1. Esistenza di un piano di massima compattazione
2. Presenza di uno sforzo di taglio (non altri sforzi perché quello di taglio è l'unico diretto nel piano di massima compattazione)
3. Presenza di due estremità fisse altrimenti l'anello libero si ingrandirebbe: il moto deve quindi essere ostacolato



Difetti di superficie

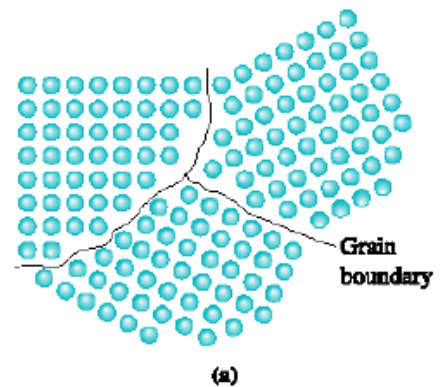
I difetti di piano o di superficie comportano la presenza di interi piani cristallini difettivi e comprendono diversi tipi di imperfezioni. Tra i difetti di superficie ricordiamo:

1. Superficie esterne = gli atomi superficiali non hanno il massimo numero di legami possibile con atomi immediatamente adiacenti e si trovano, quindi, in uno stato energetico più alto rispetto agli atomi che si trovano all'interno. I legami di questi atomi superficiali che non sono saturati danno origine a un'energia superficiale; per ridurre questa energia tendono a ridurre, se possibile, l'area della superficie totale così da raggiungere il minore contenuto energetico possibile.

2. Bordi di grano = lungo i bordi di grano, cioè il confine che separa due grani che hanno orientazione differente, sono possibili vari gradi di disallineamento cristallografico. Gli atomi posizionati lungo il bordo hanno legami meno regolari e di conseguenza c'è un'energia interfacciale simile all'energia superficiale descritta precedentemente. I bordi di grano sono quindi chimicamente più reattivi. A temperature elevate i grani si accresceranno per ridurre l'energia totale associata ai bordi dei grani. Sfruttando la mobilità delle dislocazioni sui bordi di grano è possibile ingrossare il grano stesso.

3. Piani geminati = tipo speciale di bordo di grano attraverso cui vi è una particolare simmetria speculare del reticolo cristallino; vale a dire che gli atomi che si trovano da una parte del bordo sono situati in posizione speculare rispetto agli atomi dall'altra parte del brodo. La regione di materiale compresa tra questi bordi è detta germinato. Esistono due diversi tipi di germinati:

- Germinato meccanico = germinati risultati dallo spostamento degli atomi determinato dall'azione di sforzi meccanici di taglio. Si trovano tipicamente in una struttura cubica a corpo centrata ed esagonale compatta
- Germinato da ricottura = germinati ottenuti durante i trattamenti termici di ricottura a seguito di deformazioni plastiche. Si trovano tipicamente nei metalli con una struttura cristallina cubica facce centrate.



Deformazione plastica: monocristallo

Possiamo ora descrivere come si deforma plasticamente un solido monocristallino. Un monocristallo microscopicamente è costituito esclusivamente da un unico cristallo. In base al piano di compattazione:

1. Se non c'è un piano di massima compattazione la sollecitazione di trazione applicata a un solido monocristallino comporta che tale materiale rimane invariato fino a un certo punto e poi, superato il limite, si rompe in maniera fragile perché non è presente la deformazione plastica.
2. Se invece esiste un piano di massima compattazione inclinato ad esempio a 45° gradi applicando uno sforzo questo si allunga ma non in maniera omogenea creando tanti gradini orientati a 45 gradi. (Ciò che fa muovere è la componente di sollecitazione nel piano)

Policristallo

Nella maggior parte dei casi però non si ha a che fare con un monocristallo bensì con un policristallo cioè una struttura costituita da grani con diversa orientazione. I policristalli si formano durante la solidificazione. Non appena inizia la fase di solidificazione, a una temperatura precisa, si iniziano a formare dei germi che hanno una struttura che dipende dal materiale stesso, ad esempio i grani del ferro hanno una struttura cubica a facce centrate. Questi germi, mano a mano che passa il tempo, si accrescono fino a costituire il materiale policristallino: La struttura finale non sarà costituita da un solo cristallo ma all'interno del bagno metallico saranno presenti più nuclei che con la stessa struttura cristallina ma con orientazione diversa. Se la cella unitaria è dell'ordine di grandezza dei nanometri i cristalli sono tendenzialmente dell'ordine di grandezza dei micron, anche se è possibile osservare alcuni cristalli avente ordine di grandezza del centimetro. È possibile ritrovare questi grani cristallini sulle superfici di rottura oppure nei materiali dopo un attacco metallografico in una metallografia. Importante sottolineare che non esiste alcun buco tra un grano e l'altro: c'è dunque una vera e propria continuità di materiale. Sul bordo tra due grani e dunque nel passaggio da un grano che ha un'orientazione a un altro che ha un'orientazione diversa sono presenti alcuni difetti di superficie. Il bordo di grano è dunque una struttura fortemente difettata.

Deformazione plastica: policristallo

Il grano che sentirà la maggior sollecitazione sarà il grano con la componente dello sforzo lungo il piano maggiore. Il grano dunque sottoposto a trazione si deforma allungandosi perché avverrà una somma tra le diverse dislocazioni; questo si allungherà fino a che il grano non avrà

un'energia confrontabile con il grano vicino. Le dislocazioni presenti quindi si muovono lungo il piano di massima compattazione e, spostandosi lungo i piani, si impilano a bordo grano; qui, approfittando del questo bordo di grano stesso, viene attivato il meccanismo di Frank e Read per cui si moltiplicano le dislocazioni e quindi sarà ancora più facile deformare plasticamente il componente. Capiamo dunque che la deformazione plastica:

- Nel microscopico = corrisponde al moto delle dislocazioni
- Nel macroscopico = corrisponde a una deformazione, un allungamento irreversibile

Sottoponendo il provino a trazione aumenta il numero di dislocazioni e quindi risulterà più facile deformare plasticamente il corpo; a un certo punto però le dislocazioni si saranno accumulate a bordo di grano e quindi la loro mobilità diminuirà drasticamente portando il corpo a una rottura che risulta essere fragile. Nel momento subito antecedente alla rottura del provino, quando dunque le dislocazioni sono accumulate a bordo grano, esiste la possibilità di continuare a deformare plasticamente il corpo senza portarlo a rottura: scaldando il provino e dunque fornendo energia al sistema si avrà un aumento dell'energia termica del cristallo stesso che dunque favorirà la formazione di vacanze e altri difetti che nel complesso potrebbero annullarsi e quindi non provocare alcuna frattura.

Una volta superato il punto elastico e scaricando il provino (non sottoponendolo più a sforzo) si potrà solo recuperare la deformazione elastica.

Esempio: Ipotizzando che lo sforzo del grano 1 sia 10 MPa mentre quello del grano 2 sia 7 MPa possiamo affermare che il grano 1 sentirà la sollecitazione perché ha la componente lungo il piano dello sforzo maggiore di quella del grano 2. Dunque il grano 1 si allungherà e si sommeranno tutte le dislocazioni fino a che non avrà un'energia confrontabile con quella del grano 2, o meglio fino a che le dislocazioni non si saranno impilate a bordo grano.

