



Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 2249A

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Loffredo Marianna

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali - Prof. Lombardi

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

SCIENZA e TECNOLOGIA dei MATERIALI

1

Materiale: qualsiasi solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, elettrica, ottica, magnetica, ...)

Diversi materiali possono svolgere la stessa funzione, perciò non è possibile scegliere il materiale in base alla funzione.

Oltre alla funzione del materiale, bisogna tener conto di altri vari requisiti, tra i quali:

- proprietà fisiche
 - proprietà meccaniche
 - proprietà termiche
 - proprietà elettriche
 - proprietà magnetiche
 - proprietà ottiche
 - proprietà chimiche
 - ...
- } più importanti

Famiglie di materiali

- Metalli - più antichi e più conosciuti
- Ceramici
 - < tradizionali - antichi
 - < ingegneristici - più moderni
- Polimeri - molto più moderni

Famiglie classiche

- Compositi - materiali compositi rinforzati con a matrice polimerica rinforzati con fibre.

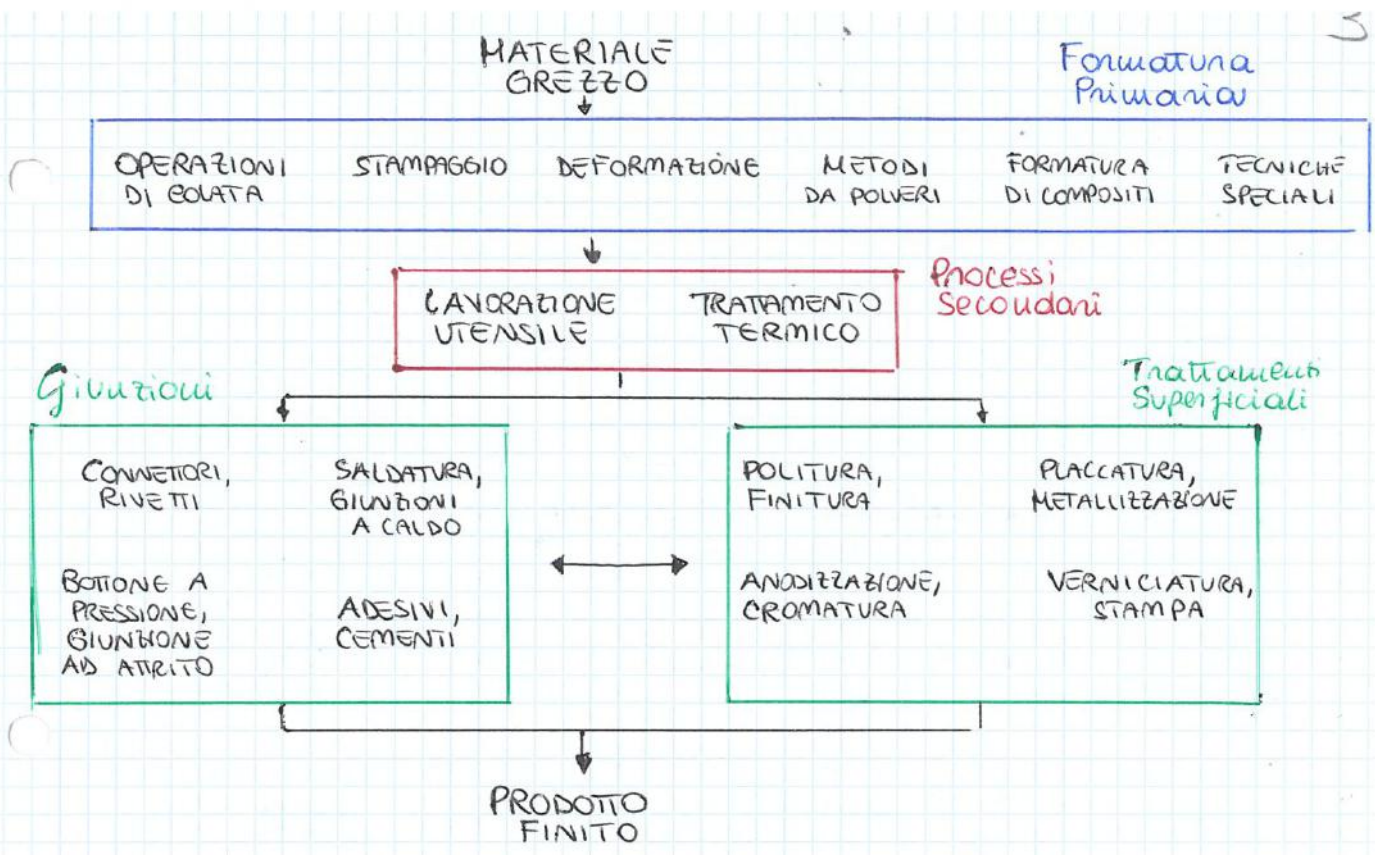
Famiglia dei compositi.

↳ NB non è corretto chiamarli materiali a fibre di carbonio, perché sono a matrice polimerica e rinforzati con fibre.

Classificazione dei Materiali

NATURALI: di origine geologica (pietre, rocce, argille, ...) & chimica (cellulosa, caucciù, carbone, ...).

SINTETICI: metalli ottenuti per trattamento dei minerali ceramici, materie plastiche, ...



La prima linea contiene i processi primari di formatura

Al di sotto si trovano i processi secondari di lavorazione a utensile e di trattamento termico. Quest'ultimo modifica la microstruttura del materiale e quindi le sue proprietà, non modifica la forma.

In fine ci sono i processi di giunzione e finitura e i trattamenti superficiali. Questi ultimi modificano la superficie esterna del prodotto che ha un ruolo fondamentale perché è la parte più esposta.

Sono utili per eliminare difetti superficiali o per proteggere il materiale da agenti esterni, utilizzando cromatura o verniciatura ad esempio.

Molto spesso, infatti, non conviene modificare le caratteristiche di tutto il materiale, ma solo la parte a contatto con l'ambiente esterno (superficie esterna), anche per ragioni economiche.

N.B. Non tutte le classi di processi possono essere applicate a tutti i materiali.

Quando si segue un materiale, bisogna scegliere anche il processo produttivo adatto.

METALLI: materiali inorganici metallici

Ampio gruppo di elementi chimici caratterizzati da un numero

variabile di elettroni di valenza delocalizzati.

Gli atomi sono legati da legame metallico.

Gli atomi, ~~inoltre~~ metallici, inoltre, quando si legano per dar vita ad un solido, tendono ad organizzarsi in strutture ordinate (cristalli).

Perciò, possono essere definiti "cristallini".

Esistono anche dei metalli "amorfici", la cui struttura è disordinata ma questi sono rari perché sono molto difficili da produrre e costosi.

In questa famiglia non vengono inseriti solo i metalli puri ma anche le leghe metalliche.



Sono costituite prevalentemente da atomi metallici ma ci sono due o più atomi diversi dai primi (solitamente anch'essi metallici, ma in condizioni specifiche ci può essere una minoranza di atomi non metallici).

es. Ottone: maggior parte di atomi di Cu, con presenza di atomi di Zn.

Fe + C $\left\{ \begin{array}{l} \text{Acciai} - \text{percentuale bassa di carbonio} \\ \text{Ghise} - \text{percentuale alta di carbonio} \end{array} \right.$

Proprietà dei materiali metallici

- OPACHI, lucenti ma non trasparenti;
- OTTIMI CONDUTTORI di elettricità e calore
- RESISTENTI ma DUTILI: elevata resistenza meccanica ma sono deformabili plasticamente (in modo irreversibile e permanente, prima di rompersi)
- TEMPERATURE DI FUSIONE VARIABILI da 660°C (Al) a 3420°C (W)
- DENSITÀ MEDIO-ALTE: metalli molto leggeri (Mg) o molto pesanti (Fe, W)
- FACILE CORROSIONE: es. corrosione del Ferro se esposto a aria o acqua con formazione di ruggine. (=> Trattamenti superficiali)
- FORMATURA prevalentemente DA FUSO: temperatura di fusione in generale non eccessivamente alta.

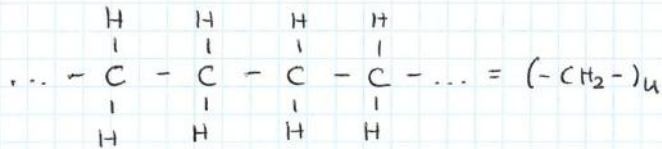
POLIMERI - Materie Plastiche - Materiali Organici

7

Materiali organici costituiti da lunghe catene molecolari (macromolecole)

nelle quali uno o più gruppi (monomeri) si ripetono concatenandosi.

La maggior parte dei polimeri sono costituiti da carbonio e idrogeno, altri contengono anche ossigeno e/o azoto e/o fluoro.



Il polimero più semplice è rappresentato

da atomi di carbonio legati tra loro

che formano due legami con l'idrogeno.

NB il carbonio forma 4 legami singoli.

Legami INTRA-CATENA: legami forti, di tipo covalente (C-C, C-H).

Legami INTER-CATENA: legami prevalentemente deboli, interazioni di Van Der Waals, legami secondari.

Tuttavia, le proprietà sono molto variabili da famiglia a famiglia:

- Termoplastici TP: sono duttili. (deform. plastica)
- Termoindurenti TI: sono fragili (deform. elastica)
- Elastomeri o Gomme: estensibilità deformazione elastica prima di rottura. Quando non si applica più la forza ritornano nella condizione iniziale.

Varia anche la disposizione degli atomi:

- TP: ~~disordi~~ struttura disordinata, non reticolata o parzialmente cristallina.
- Elast/TI: legami trasversali, di natura covalente.
 - Elast: debolmente reticolato
 - TI: fortemente reticolato.

Le catene polimeriche formano un involuppo senza una struttura regolare e ripetitiva, questa struttura è detta "amorfa" o "vetrosa".

Alcuni polimeri possono presentare delle zone in cui le catene giacciono regolarmente e interagiscono, dando vita a zone cristalline.

Gli elastomeri presentano dei legami trasversali occasionali tra le catene, ma abbastanza lontani da permettere alle catene di estendersi reciprocamente.

I polimeri con un numero elevato di legami trasversali, come le resine epossidiche, non consentono alle catene di scostarsi.

DENSITÀ E MODULO ELASTICO

Studiamo la risposta meccanica dei materiali.

Hp: modello a sfere rigide di Bohr.

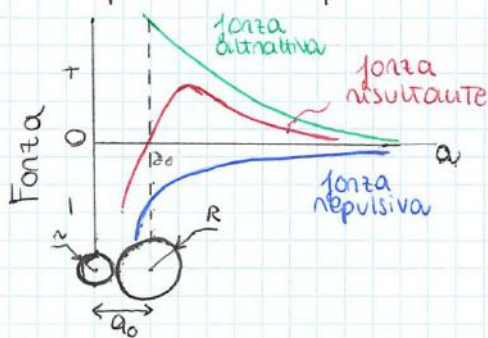
Curva di Coudou - Morse

Quando due atomi instaurano un legame, si trovano alla distanza di legame (a_0) e hanno la minima energia (E_{min}).

Gli atomi risentono di forze attrattive e repulsive, al variare della loro distanza.

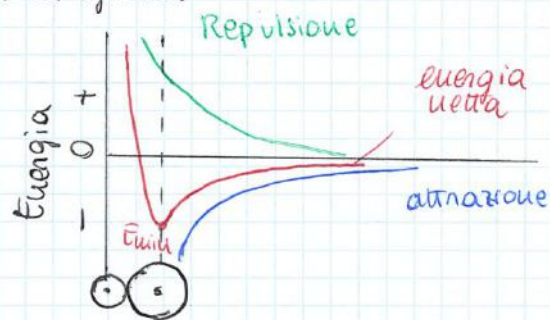
Inizialmente essi risentono di forze attrattive, ma quando si avvicinano troppo il bilanciamento a prevalere forze repulsive.

Possiamo ripartire su un grafico la forza tra gli atomi in funzione della distanza e dall'andamento della forza possiamo estrapolare la quantità di energia in gioco.



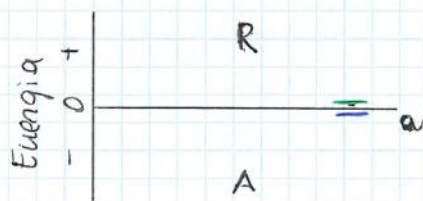
r, R raggi atomici

$a_0 = \text{distanza di legame} = r + R$.



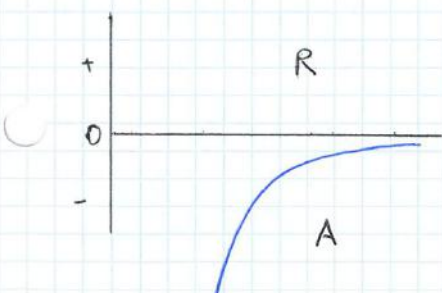
In a_0 forze attrattive e repulsive si bilanciano perfettamente. In corrispondenza di quella distanza a_0 si trova un minimo di energia (E_{min}).

Le curve energia - distanza sono le curve di Coudou - Morse.



A distanza infinita l'interazione è nulla.

Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive.



Avvicinandosi gli atomi si attraggono e l'energia diminuisce mentre a diminuisce.



~~Nel momento~~

1.

Applicare una forza al materiale vuol dire trasferirgli energia, si perturba la condizione di massima stabilità: dall'esterno arriva energia in più e gli atomi devono cercare di utilizzare quest' energia in più, andando verso una nuova forma.

La deformazione che un materiale può subire, a seconda delle caratteristiche del materiale, può essere di tipo:

- elastico: nel momento in cui è una deformazione reversibile, (deformazione che rimane fino a quando rimane l'azione esterna). Quando annulliamo la forza esterna, il materiale ritorna nel suo stato iniziale.
- plastico: deformazione irreversibile. La deformazione rimane anche quando la forza esterna si annulla.

Tutti i materiali sono in grado e rispondono a delle sollecitazioni con deformazioni reversibili - la deformazione elastica è comune a tutti i materiali.

La deformazione plastica è caratteristica solo dei materiali duttili.

Nel momento in cui applico una forza a un materiale, ho due possibili risposte:

↳ Ceramici

- Comportamento fragile: deformazione elastica, fino a rottura
- Comportamento duttile: deformazione elastica, poi plastica, fino a rottura

↳ gran parte dei metalli

Il termine "fragile" non è sinonimo di "delicato".

In inglese c'è una distinzione tra "fragile" e "brittle".

Comportamento di un materiale che arriva a rottura con forze relativamente basse (delicato)

Materiale che arriva a rompersi avendo subito deformazioni solo di tipo elastico.

Molto spesso capita che un materiale "brittle" NON è un materiale "fragile". (es. diamante - materiale ad alta resistenza ma con comportamento fragile)

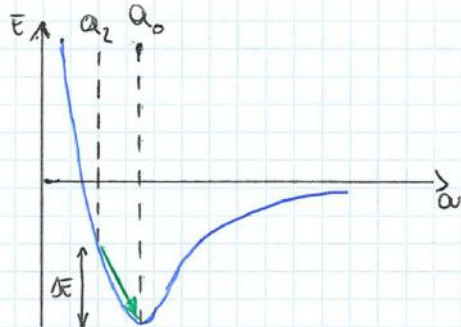
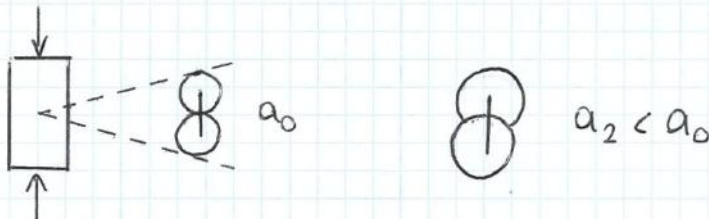
I due atomi non possono avvicinarsi perché c'è la forza esterna ma non possono allontanarsi all'infinito perché c'è il legame che continua a mantenerli uniti.

La unica cosa che è cambiata è la lunghezza del legame, che si traduce in uno spostamento nella curva di Lennard-Jones. Quando annullo la forza esterna, rimangono solo le forze attrattive che riportano gli atomi nel punto iniziale.

⇒ Passaggio della reversibilità

Applichiamo ora una solicitazione a compressione.

Diminuendo la distanza a_0 , prevalgono le forze repulsive.



La compressione porta i due atomi ad avvicinarsi di più. Passiamo dalla distanza a_0 alla distanza $a_2 < a_0$ per la variazione di energia imposta.

Compressione = repulsione.

Una volta ~~att~~ annullata la sollecitazione esterna, vince l'azione repulsiva che riporta gli atomi nel punto (a_0, E_0) .

Le curve di Lennard-Jones, pertanto, giustificano SOLO ed ESCLUSIVAMENTE la deformazione ELASTICA.

Le curve di Lennard-Jones spiegano il perché il materiale si deforma elasticamente. **ESAME!**

Vediamo come influisce la tipologia del legame.

Consideriamo due coppie di atomi legati tra loro con legami diversi (le curve che rappresentano il bilanciamento delle forze sono differenti tra di loro).

Applicando la stessa forza a due materiali diversi, viene fornita a tutti e due i sistemi la stessa energia.

Una volta ricevuta questa energia, i sistemi andranno a modificarsi a seconda della curva di Lennard-Jones.

Per tutti i materiali, in un campo ben definito, vale la legge di Hooke. ↙
 A seconda della sollecitazione applicata (σ), il materiale risponderà con una deformazione (ϵ) che è direttamente proporzionale alla sollecitazione imposta e la proporzionalità vale in base a una costante definita come modulo elastico o modulo di Young (E).

La Legge di Hooke vale per deformazioni completamente reversibili] NB

Questa proporzionalità diretta è correlata a una proprietà intrinseca del materiale: proprietà che il materiale mantiene e conserva in tutte le condizioni => il modulo elastico.

Modulo elastico: misura la resistenza al cambiamento di forma del materiale nel momento in cui applichiamo una sollecitazione e siamo nel campo della deformazione elastica.

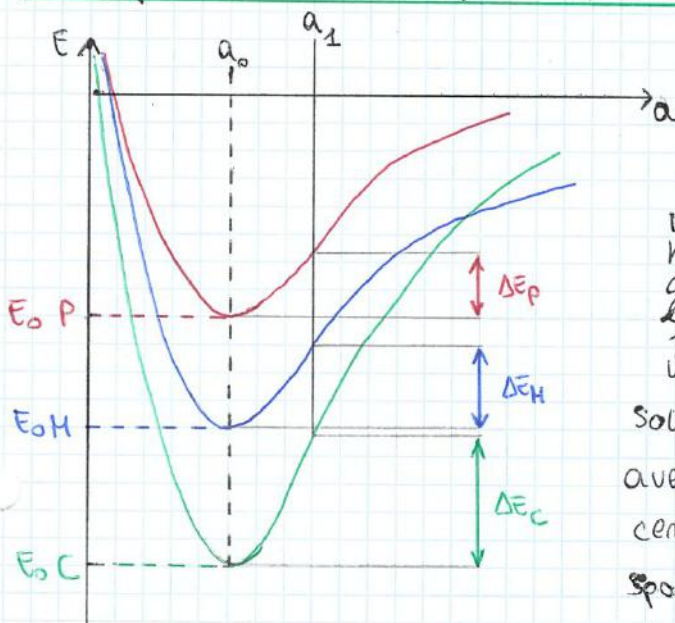
Rigidità Parlare di un materiale rigido vuol dire parlare di un materiale che si oppone alla minima variazione della sua forma in maniera reversibile.

Un materiale molto rigido sarà caratterizzato da un modulo elastico molto elevato. => applicando una sollecitazione il materiale si deformerà in maniera limitata.

A livello microscopico si traduce in una resistenza degli atomi ad allontanarsi e avvicinarsi.

In realtà quello che resiste è il legame, perciò la correlazione diretta tra l'energia del legame e la rigidità del materiale è proprio in questa visione.

Più forte sarà il legame, più il materiale sarà rigido



- **Ceramics** (l. covalenti - valore energetico più alto)
- **metalli** (l. metallico - ad alta energia)
- **polimeri** (l. secondario)

I tre legami che stiamo considerando hanno distanze di legame (a_0) diversi tra di loro. Nella rappresentazione le tre curve sono state traslate per far coincidere i tre valori di a_0 per una più facile lettura e confronto.

Sollecitiamo il materiale in modo da avere la stessa deformazione per un ceramico, metallo, polimero.

Sposto gli atomi portandoli tutti alla nuova distanza a_1 .

Il Modulo Elastico è una grandezza tipica del materiale che dipende, a livello microscopico, da due ulteriori parametri: distanza di legame e rigidità del legame.

Entrambi i parametri sono relativi alla tipologia di legame.

$$E = \frac{S}{a_0}$$

S = rigidità del legame
 a_0 = distanza di legame.

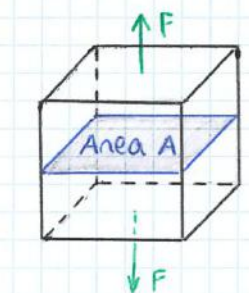
Correlazione macroscopico - microscopico:

tutto quello che prevede l'applicazione di una forza e la deformazione del materiale è ~~stato~~ macroscopico (forza e deformazione).

tutto quello che riguarda il legame (rigidità, distanza, energia di legame) è microscopico.

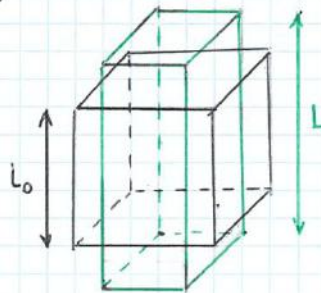
Trazione / Compressione Uniaxiale

•) Trazione Uniaxiale



Sollecitazione a trazione

$$\sigma = F/A$$

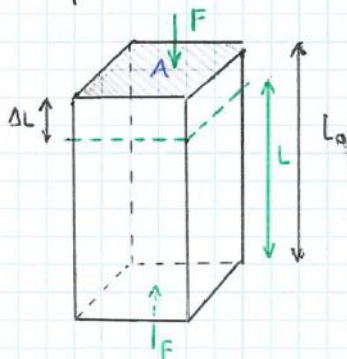


Deformazione a trazione

$$\epsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

Il materiale reagisce con una variazione della sua lunghezza $\Delta L > 0$
 $(L > L_0)$

•) Compressione Uniaxiale



Forza applicata in verso opposto.

La sollecitazione in compressione è negativa perché indichiamo per convenzione una forza negativa

$$\sigma = - \frac{F}{A}$$

Il materiale reagisce accorciandosi:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \Delta L < 0 \quad (L < L_0).$$

In alcuni casi, però, non è immediato trovare la componente uniaxiale e dobbiamo considerare altre condizioni:

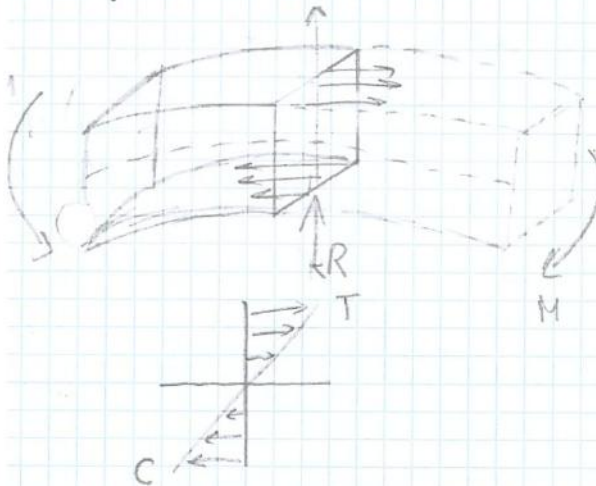
•) Sollecitazione di Taglio



La forza agisce in maniera parallela rispetto all'area interessata.

Non possiamo ricondurlo a sollecitazioni uniaxiali.

•) Flessione



Flettere un componente vuol dire indurre uno stato misto tra una sollecitazione a trazione e una sollecitazione a compressione.

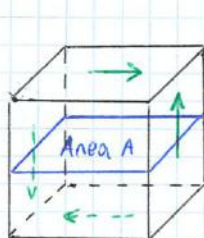
All'interno del componente si passa dal massimo della sollecitazione a trazione (che misuro sulla superficie più alta) al massimo della sollecitazione a compressione (che misuro sulla superficie più bassa).

Le costanti elastiche variano per tener conto delle sollecitazioni in gioco.

• Trazione / Compressione Uniaxiale

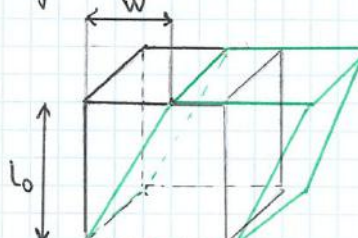
$\sigma = E \epsilon$ vale la legge di Hooke.

• Sollecitazione di taglio



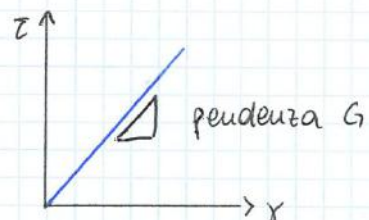
Sollecitazione

$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A}$



Deformazione

$\gamma = \frac{w}{l_0}$



$\tau = G \gamma$

$\tau = G \gamma$

G = Modulo di Taglio.

Quando parliamo di materiali isotropi, abbiamo le due deformazioni identiche tra di loro. 2.

Applicando una trazione uniaassiale, abbiamo una deformazione longitudinale (nella direzione della forza) positiva ($\Delta L > 0$).

Il coeff. di Poisson, proprio per quel segno (-) ci dice che se la deformazione lungo la direzione della forza è positiva, allora nell'altra direzione il materiale subirà una deformazione negativa (il materiale si allunga ma si restringe).

Analogamente, nel caso di compressione uniaassiale, il materiale avrà una deformazione longitudinale negativa e il coeff. di Poisson ci dice che il materiale nella sua sezione sta subendo una deformazione trasversale positiva.

Quindi:

- trazione uniaassiale: deformazione longitudinale positiva, deformazione trasversale negativa.
- compressione uniaassiale: deformazione longitudinale negativa, deformazione trasversale positiva.

Nel caso di materiale isotropo: $\epsilon_x = \epsilon_y$

Perciò
$$\nu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon}$$

↳ ϵ = deformazione lungo z

Ragioniamo per assurdo:

assumiamo $\nu = 0,5$

Se $\nu = 0,5 \Rightarrow |\epsilon_x| = \frac{1}{2} |\epsilon|$
 $|\epsilon_y| = \frac{1}{2} |\epsilon|$

deformazione lungo x o y uguale a $\frac{1}{2}$ deform. lungo z.

La somma delle due deformazioni lungo x e y, è la deformazione che misuriamo lungo z

$$|\epsilon_x| + |\epsilon_y| = |\epsilon|$$

il materiale si deforma secondo Hooke lungo z e secondo Poisson lungo x e y ma con $\nu = 0,5$ tutto questo avviene senza variazione di volume $\Delta V = 0$.

Nel caso in cui $\nu = 0,25$ (ν inferiore a 0,5)

La dilatazione porta a dire che la variazione di volume è positiva $\Delta V > 0$.

$$|\epsilon_x| = \frac{1}{4} |\epsilon|; |\epsilon_y| = \frac{1}{4} |\epsilon| \Rightarrow |\epsilon_x| + |\epsilon_y| = \frac{1}{2} |\epsilon|$$

Come misurare il modulo elastico E !

Misurarlo come pendenza della retta sforzo-deformazione è molto approssimativo. - non è il metodo più appropriato.

La misura corretta del modulo di Young si fa attraverso

misure dinamiche; in cui si va a misurare la velocità di propagazione delle onde sonore all'interno del materiale.

Questa velocità dipende da modulo elastico E e densità ρ

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

In un primo tratto la curva sforzo-deformazione è una retta, quando si tratta di deformazioni elastiche.

Successivamente la curva varierà a seconda del materiale.

materiale fragile: il materiale si rompe ma ha comportamento elastico fino a rottura

materiale duttile: il materiale subisce, oltre alla deformazione elastica anche deformazione irreversibile, plastica, prima di pervenire a rottura.

Prima di vedere come ^{prosegue} ~~si modifica~~ la curva nel caso di materiale duttile, dobbiamo vedere come sono sistemati gli atomi nei materiali.

* ESERCITAZIONE MODULO ELASTICO *

Vediamo come gli atomi vanno ad occupare tutto il volume che hanno a disposizione nel solido.

Prima di tutto suddividiamo: (a livello atomico)

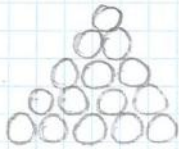
- materiale cristallino
- materiale amorfo.

Per esempio la silice ha due strutture alternative, silice cristallina e silice vetrosa (amorfa). Ogni atomo di Silicio è sempre legato a due atomi di Ossigeno in entrambe le strutture, perciò la situazione a corto raggio è la stessa. Ma a lungo raggio si nota che nel caso del materiale cristallino, questi gruppi di atomi (SiO_2) vanno a legarsi tra di loro rappresentando sempre la stessa figura geometrica (esagono) con atomi di Si sempre nei vertici e atomi di O sempre a metà di un lato dell'esagono e si ripetono così all'infinito all'interno del volume di quel materiale cristallino.

Per il solido amorfo non si identifica una ripetibilità a lungo raggio.

Nel creare una disposizione ordinata, gli atomi ~~comano~~ tendono ad occupare il maggior volume possibile. Più gli atomi sono compatti, più il volume del solido è pieno e quindi c'è materia che può rispondere alle sollecitazioni esterne.

Immaginiamo strato per strato come questi atomi possono disporsi.



Strato a impaccamento compatto



Strato a impaccamento non compatto

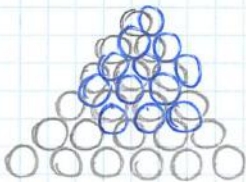
I Strato: O

Nel riempire il piano il principio è quello di occupare più volume possibile quindi di tendere a strutture compatte.

Per cui gli atomi non si dispongono uno accanto all'altro nella direzione x e y , ma si dispongono in uno strato compatto triangolare



II Strato O



Gli atomi si dispongono tra le valli degli atomi della prima fila in modo da minimizzare lo spazio tra i due piani.

ABAB

III Strato O



Il terzo strato può collocarsi in modo da non sovrapporsi né ad A né a B, con sequenza

ABCABC

In realtà per minimizzare gli annullamenti possono disporsi anche nell'esatta posizione del primo strato.

Possiamo avere diverse configurazioni:

[ABABAB] se nel terzo strato gli atomi si dispongono come A, nel quarto strato come B...

[ABCABC] se nel terzo strato gli atomi non corrispondono né con A con B.

A prescindere dalla sequenza, si riempie il più possibile il volume a disposizione.

In natura, le proprietà intrinseche possono essere modificate, modificando la composizione del materiale.

Si possono realizzare dei compositi, inseriamo all'interno del materiale una seconda o una terza fase che hanno caratteristiche differenti in termini di modulo elastico e di densità. Perciò il risultato materiale che risulta di questa miscela di materiali avrà densità e modulo elastico dipendenti dai suoi componenti e dalle proprietà intrinseche dei suoi componenti.

Un'altra possibilità è quella di realizzazione delle schiume, cioè dei materiali che presentano al loro interno degli spazi vuoti e quindi andiamo a svuotare il volume del solido. Sottraendo materia avremo una conseguenza sia sulla densità che sul modulo elastico.

Analizziamo meglio schiume e compositi:

SCHIUME: parliamo di schiume o materiali porosi nel momento in cui all'interno del volume del solido che stiamo considerando inseriamo volutamente dei vuoti (azione consapevole).

In alcune applicazioni è necessaria la presenza di pori perché si vuole che un gas o una sostanza riesca a penetrare all'interno del materiale (es. filtri o manufatti catalitici).

~~Materiali~~ I materiali porosi possono essere realizzati con diverse tecniche che dipendono dalla natura del materiale.

Per un materiale che può essere portato allo stato fuso, si ~~può~~ ^{possiamo} inserire all'interno della massa fusa delle bolle di gas che ~~al~~ al momento della solidificazione lasciamo un "poro".

Nel caso in cui non si può fondere il materiale (ceramici) si parte da una polvere che può essere miscelata con sostanze liquide. ~~Una~~ Una volta ottenuto il materiale allo stato liquido si possono inserire delle porosità attraverso bolle di gas.

Un'altra tecnologia per i materiali ceramici è utilizzare delle sostanze che rimangono solide nel momento in cui diamo la forma che però possono essere solubili (la polvere ceramica non lo è), e immergendolo nel liquido che riesce a solubilizzare queste sostanze, le sciogliamo e restano i pori.

Strutture porose si possono realizzare anche in modo più complesso attraverso la struttura a nido d'ape.

Regola delle Miscele

La regola delle Miscele vale per i volumi

$$f_m = \frac{V_m}{V_m + V_f}$$

Frazione in volume della matrice

$$f_f = \frac{V_f}{V_m + V_f}$$

Frazione in volume della fibra

[m = matrice]
[f = fibre]

Possiamo andare a prevedere le proprietà del composito che realizziamo, prendendo una proprietà specifica del composito:

$$P_c = f_f P_f + f_m P_m$$

frazione ~~matrice~~ in volume delle fibre per proprietà delle fibre + frazione in volume della matrice per proprietà della matrice

Per esempio, nel caso della densità:

$$\rho_c = f_f \rho_f + f_m \rho_m$$

più fibre mettono più avanzato impatto sulla densità della matrice

Per questo un composito con fibre avrà un peso molto più contenuto di un metallo

Per quanto possono pesare le fibre, sono densità le inseriamo in una matrice polimerica che ha densità bassissima.

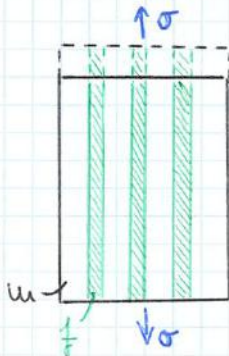
Posso sfruttare l'elevata rigidità delle fibre pur mantenendo la leggerezza del materiale => proprietà simili a un metallo con peso contenuto.

È utile applicare la RDI per la densità, perché essa prescinde dalla direzione in cui la misuriamo.

Il discorso cambia nel caso del modulo elastico perché la rigidità del materiale è una risposta a una sollecitazione esterna.

Applicando la sollecitazione in una direzione potrebbe cambiare la risposta di un composito rinforzato con fibre:

•) Sollecitazione in direzione parallela alle fibre



Il materiale risponde con una ISODEFORMAZIONE

La matrice e le fibre subiscono la stessa deformazione

$$\sigma = f_f \sigma_f + f_m \sigma_m \quad \sigma \text{ distribuita tra } f \text{ e } m.$$

i due materiali subiscono la stessa deformazione (in campo elastico, applichiamo Hooke)

$$\sigma = f_f E_f \epsilon + (1 - f_f) E_m \epsilon$$

$$E_c = \frac{\sigma}{\epsilon} = f_f E_f + (1 - f_f) E_m$$

Modulo elastico del composito.

Concentriamoci ora sull'obiettivo principale nel campo aerospaziale:

il progetto in leggerezza.

(Non è il requisito principale, ovviamente)

Oppure si può procedere con le proprietà specifiche:

* Tiene conto del valore assoluto della proprietà di interesse, rapportando questa proprietà alla densità del materiale.

Se vogliamo essere esattissimi il volume del materiale che stiamo considerando

$$\text{Proprietà Specifica} = \frac{\text{Valore assoluto della proprietà}}{\text{Densità}}$$

A parità di volume, rigidità o resistenza abbiamo diversi materiali che permettono di risparmiare in peso (grafici fine slide 2c)

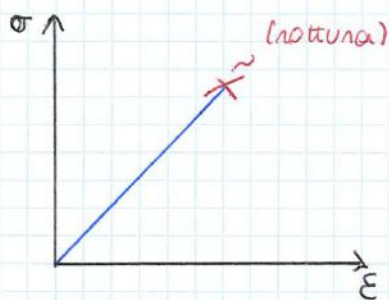
- * ESERCITAZIONE RETICOLI CRISTALLINI *
- * ESERCITAZIONE MODULO ELASTICO *

LA DUTILITÀ - Oltre l'elasticità

Riprendiamo i concetti di rottura fragile e rottura duttile perché in questi due casi abbiamo due curve sforzo-deformazione differenti.

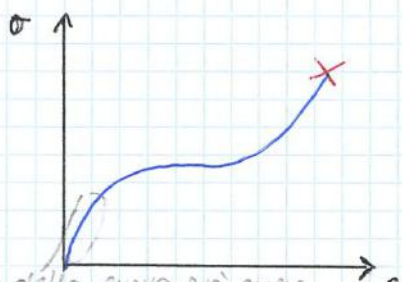
materiali fragili: il materiale si rompe dopo una deformazione elastica

materiali duttili: il materiale subisce, oltre alla deformazione elastica, anche una deformazione irreversibile (plastica) prima di pervenire a rottura.



FRAGILE: (ceramici e TI) ^{polimerici}

il materiale arriva a rottura dopo certi valori di deformazione elastica - solo tratto lineare prima della rottura (vale Hooke)



Elastomeri:

materiali fragili ma con curva σ - ϵ diversa dalla precedente.

La deformazione elastica viene rispettata ma la curva non presenta solo il tratto lineare.

L'inizio della curva può essere approssimato a una retta, solo in questa zona vale la legge di Hooke

=> La legge di Hooke vale per sforzi molto molto bassi.

legami degli atomi vicini che si oppongono a questo movimento. Ragione per la quale non si avvicinano esattamente alla distanza di legame, risentono solamente della forza attrattiva, e si avvicinano leggermente portando una modifica a una zona molto ridotta del reticolo.

Ci sarà una variazione dell'energia complessiva ma sarà molto ridotta per cui avrà delle conseguenze ridotte rispetto al caso ideale.

SOSTITUZIONALI



- atomi SOSTITUZIONALI: presenza di un atomo diverso che sostituisce un atomo proprio del reticolo

Nel momento in cui inseriamo un altro atomo, ci sarà sicuramente una perturbazione nel reticolo.

L'atomo che inseriamo all'interno del reticolo non può essere di qualsiasi tipo, deve rispettare delle regole, una di queste è relativa alla dimensione (deve sostituire un atomo avente determinate dimensioni).

Se inseriamo un atomo più grande, ci sarà un allungamento degli atomi più vicini per "fargli spazio".

Ci sarà una modifica del reticolo perché variano le distanze di legame. Dalla curva di EM si vediamo che l'energia aumenta perché costringiamo gli atomi a spostarsi verso distanze di legame più piccole ($a_1 < a_0$) e di conseguenza l'energia aumenta.

Se inseriamo un atomo più piccolo, gli atomi che lo circondano hanno la possibilità di contrarsi, sempre a causa delle forze attrattive di cui risentono con il nuovo atomo.

Anche in questo caso l'energia aumenta.

INTERSTIZIALI



- atomi INTERSTIZIALI: presenza di un atomo più piccolo in posizione interstiziale

Presenza di atomi in posizioni del reticolo che dovrebbero essere vuote (non c'è sostituzione).

L'inserimento di questi atomi porta di nuovo a una modifica del reticolo, che perché anche se piccoli, tendono a farsi spazio e quindi gli atomi attorno tenderanno a muoversi

Tutti questi difetti puntuali non portano una grande differenza energetica all'interno del reticolo, ma sono fondamentali per le leghe.

↳ Una lega Fe-C (acciai) è una lega interstiziale perché l'atomo di C è molto più piccolo dell'atomo di Fe.

Un'altra conseguenza della presenza di questi difetti è la diffusione allo stato solido: meccanismo grazie al quale nel momento in cui il materiale è solido, riusciamo a modificare la composizione proprio grazie a dei moti diffusivi della materia. Quando si parla di soluzione, si va a ripescare il concetto di solvente e di soluto

solvente: sostanza presente in maggiore quantità

soluto: sostanza che si aggiunge.

Nel caso della lega, il solvente sarà l'elemento che occupa la maggior parte dei posti del reticolo, il soluto è rappresentato dagli atomi estranei che si inseriscono

Soluzione solida SOSTITUZIONALE

Soluzione solida INTERSTIZIALE

(Soluzione solida e lega rappresentano lo stesso concetto).

Si devono rispettare delle regole precise:

Regole di Hume-Rothery:

L'atomo sostituito e l'atomo da sostituire devono avere:

- stessa valenza
- stesso reticolo cristallino
- simile elettronegatività
- differenza tra raggi atomici < 15%

L'unico requisito è che l'atomo estraneo sia sufficientemente piccolo

La soluzione solida è sempre parzialmente miscibili

(acciai e ghise Fe-C)

Possiamo poi avere tre situazioni:

- Miscibilità totale - non c'ha differenza nel materiale ~~total~~ fonde (W)
- Miscibilità parziale - due sostanze nepo (Al e W)
- Immiscibilità - due sostanze seporate

↓
Diagrammi di stato

quello che era originariamente il volume del solido B.

4

Non abbiamo più zone nettamente separate => miscibilità totale.

Ovviamente, le vacanze presenti nei reticoli rendono più semplice la diffusione. C'è un percorso più semplice per occupare il volume dell'altro solido.

La Driving Force (Forza Principale) di questo fenomeno è proprio il gradiente di concentrazione.

Partiamo da una condizione con concentrazioni nettamente diverse delle due specie e tendiamo ad una condizione in cui la concentrazione di ogni specie risulta essere costante.

Man mano che il fenomeno va avanti nel tempo, la Driving Force risulta meno importante perché la differenza di concentrazione va ad appiattirsi verso un valore unico (per questo servono tempi infiniti).

La diffusione allo stato solido è regolata dalla

$$J_x = -D \frac{dc}{dx}$$

Legge di FICK

Il flusso atomico (J_x), cioè la quantità di materia che nell'unità di tempo riesce a fluire nell'unità di superficie, nella direzione x (passando da un materiale A a un materiale B) dipenderà dal gradiente di concentrazione $\frac{dc}{dx}$ secondo una costante definita come

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Coeff. di Diffusione / Diffusività [m^2/s]

che è tipica di ogni materiale e dipende dall'energia di attivazione del moto atomico (Q), dalla costante dei gas e dalla temperatura.

Capiamo così, attraverso il coeff. di diffusione D , quanto è importante la temperatura nel processo di diffusione allo stato solido.

Alcune conseguenze della diffusione allo stato solido sono

- Cementazione (carbonazione) degli acciai:

si cerca di far diffondere gli atomi di carbonio nel ferro.

Il ferro è allo stato solido, gli atomi di C invece arrivano attraverso il sistema gassoso presente all'interno del forno, ~~per~~ in questo modo proprio grazie ai fenomeni di diffusione allo stato solido, gli atomi di C ~~per~~ presenti in grandi concentrazioni intorno al materiale solido, riescono man mano a penetrare nel reticolo andando ad occupare

Siamo al di sopra dello spazio disponibile in entrambi i casi.

Gli atomi di Fe devono spostarsi per far spazio agli atomi di C.

Introdotta l'atomo di C, si riduce la dimensione degli interstizi intorno

In una FCC questa riduzione è minore rispetto a una CCC, dove devo riuscire a creare uno spazio maggiore.

In CCC si riduce molto di più il volume degli altri interstizi e riduco quindi la possibilità di inserire atomi di carbonio.

Perciò:

DIFFUSIVITÀ \neq SOLUBILITÀ

misurata in m^2/s .

velocità con la quale il C attraversa una certa area

quantità massima di soluto che può miscelarsi con il solvente senza che rimangano separati.

•) Defetti di linea: dislocazioni

È un difetto che interessa una linea specifica del reticolo (monodimensionale). La dislocazione è un riempimento aggiuntivo di atomi che perturba una zona del reticolo creando degli stati tensionali nel suo intorno.

Nella zona in cui abbiamo inserito il riempimento in più gli atomi sono in una condizione di compressione. Appena termina questo riempimento, subito al di sotto, gli atomi sono in una condizione di trazione.

Aggiungendo un riempimento, i piani adiacenti tendevano ad allontanarsi per far più spazio, ma questo riempimento non interessa tutta la lunghezza perciò c'è una parte che rimane nella posizione in cui era.

Gli atomi in corrispondenza dell'inizio del riempimento si adeguano, ma quelli ~~che~~ posti alla fine del riempimento non possono lasciare una fila completamente vuota se il riempimento è terminato, perché ci sono dei legami che prevedono una certa distanza, quindi assolvono leggermente gli spostamenti degli atomi che lo precedono. Le tensioni si accumulano nella zona in cui termina il riempimento.

Nella zona in cui ho inserito il riempimento gli atomi si sono spostati e hanno messo in compressione ~~di~~ i legami con gli atomi adiacenti, nella zona subito sotto il riempimento, per cercare di ammorbidire gli atomi sopra, allungano un po' i legami e quindi stato di trazione.

Lo stato di tensione va ad interessare la stessa zona di ogni piano parallelo a quello, e porta alla costruzione della linea di dislocazione.

Il reticolo tende, attraverso il meccanismo di ~~rea~~ creazione e rottura dei legami, a far scendere il semipiano aggiuntivo al fine di farlo arrivare al termine del reticolo stesso perché in quest'ultima configurazione il sistema riesce ad essere più stabile, quindi ^{ha} un'energia sicuramente inferiore rispetto a quella del punto di partenza.

Non è l'energia ideale ma è comunque una situazione vantaggiosa. Quindi il semipiano continua a scendere all'interno del reticolo fino a creare il "gradino" che va a rendere la situazione più stabile.

È vero che abbiamo alla fine due semipiani da una parte e dall'altra del reticolo che non hanno tutto il resto degli atomi, ma se escludiamo i due semipiani, il reticolo resta nella configurazione ideale, con tutti gli atomi alla distanza di legame a e alla minima energia.

Lo sforzo di taglio necessario per avviare il ~~movimento~~ movimento dislocativo è in realtà ~~uno sforzo di taglio che non~~ ~~deve~~ essere necessariamente di grande entità perché deve servire per spostare l'atomo A e l'atomo B affinché l'atomo A possa iniziare a esercitare le forze attrattive sull'atomo C.

NB tutto si verifica in un materiale solido che continua a essere integro, tutti i legami che gli permettono di essere solido vengono immediatamente sostituiti.

Il movimento dislocativo è facilitato proprio dalla presenza del semipiano dislocativo

Se gli atomi fossero nelle loro posizioni ideali, ϕ sarebbe molto più difficile perché dovrebbe spendere molta più energia per spostare A.

Le dislocazioni appartengono al reticolo cristallino, perciò tutti i materiali cristallini (metalli e ceramici) presentano questo difetto

Ci sono però delle differenze su come un materiale o un altro reagiscono alla presenza di questi difetti, che diventano fondamentali per i meccanismi di scorrimento.

Nel momento in cui una dislocazione deve scendere all'interno del reticolo, bisogna considerare le condizioni al contorno e quali sono le situazioni che più favoriscono questo tipo di scorrimento.

• **EFE**: i piani di scorrimento appartengono alla famiglia di piani con indici $\{1\ 1\ 1\}$ \Rightarrow 4 piani e 3 direzioni per piano.

maggiori sono le direzioni, più è probabile che il piano sia orientato nel modo corretto per far muovere la dislocazione.

$4 \cdot 3 = 12$ possibilità per far scivolare una dislocazione

• **EC**: solo un piano $\{0\ 0\ 1\}$ \Rightarrow 1 piano e 3 direzioni

$1 \cdot 3 = 3$ sistemi che favoriscono il movimento.

tenendo conto del F.I.A. e dei sistemi sopra del numero di piani di scorrimento, possiamo definire una scala di durezza

	CFC	CCC	EC
F.I.A.	0,74	0,68	0,74
N° piani di scorr.	12	12	3

CFC > CCC > EC

(Resistenza materiali metallici puri)

Facciamo riferimento alla durezza (capacità del materiale di deformarsi in maniera irreversibile) perché affinché il materiale si deformi in modo irreversibile dobbiamo muovere gli atomi ma soprattutto rompere i legami, proprio quello che fa la dislocazione.

La deformazione plastica è proprio una conseguenza delle dislocazioni

Macroscopicamente, il movimento delle dislocazioni provoca una variazione di lunghezza del materiale \Rightarrow il materiale si deforma.

Una volta che la dislocazione arriva all'estremo, in tutto il resto del reticolo ho dei legami che impediscono che il sistema torni indietro.

Anche se non si applica più una sollecitazione, il reticolo \rightarrow i nuovi legami si sono già formati e il reticolo resta in

quella configurazione \Rightarrow il materiale mantiene la deformazione

[Ponere di durezza nei metalli vuol dire indurre il movimento dislocativo.]

Ma questo non è possibile perché nelle dislocazioni il legame è rompente e si ricostruisce prima. Anche a meno per un ceramico covalente, A dovrebbe trovarsi nell'esatta posizione di B.

Dovremmo rompere tutti i legami, spostare di una posizione atomica e poi riformare tutti i legami, abbiamo bisogno di tutta l'energia necessaria per rompere tutti i legami lungo il piano di scorrimento.

=> Nel caso dei ceramici le dislocazioni esistono ma non si muovono => hanno una rottura fragile.

•) Difetti di superficie - Bordi di Grano



Il grano successivo avrà la stessa cella elementare ma cambierà l'orientazione.

Da una ~~zona~~ ^{posizione} all'altra, nelle zone di confine, dobbiamo incontrare queste diverse direzioni e quindi si creano delle zone difettuali che sono i Bordi di Grano.

(Attenzione il fatto che ci sia un difetto di superficie non implica che non ci siano difetti puntuali o di linea.)

=> I Bordi di Grano sono difetti di superficie che separano due grani adiacenti nei solidi policristallini.

Nella zona di confine, tra i volumi, gli atomi non trovano delle posizioni ottimali con gli atomi confinanti (cambia il reticolo) e si creano delle vacanze.

queste suo a miscibilità parziale.

Partendo da una matrice di puro Al (solvente) comincia ad aggiungere all'interno degli atomi di Cu, questi atomi di Cu vanno a presenziare dei difetti sostanziali (rispettano le regole di Hume Rothery) ma fino a un certo limite (limite di solubilità).

Oltre questo limite, non c'è più possibilità per gli atomi di Cu di posizionarsi all'interno del reticolo e quindi Al e Cu creano dei precipitati ($CuAl_2$, composto intermetallico).

Nel caso di questo precipitato specifico, essendoci un rapporto stechiometrico ben preciso, dobbiamo allontanarci dalla definizione di metallo.

Ha un po' di natura metallica perché al suo interno noi solo ~~tre~~ elementi metallici (Al e Cu) ma questi due all'interno dei precipitati si legano tra di loro andando a rispettare un rapporto stechiometrico (proprietà che avevamo attribuito ai ceramici).

Per questo motivo, questo composto prende il nome di INTERMETALLICO, e ha un comportamento più vicino al covalente che al metallico da un punto di vista dei legami.

I precipitati possono avere dimensione sufficientemente grande e si concentrano lungo i Bordi di Grano, proprio perché sono delle strutture estranee rispetto al reticolo principale (soluzione solida), vanno a posizionarsi nella zona che è più energeticamente instabile, invece che andando a perturbare la zona di reticolo più regolare all'interno del grano.

Se, invece, i precipitati mantengono una dimensione molto piccola, perturbano il reticolo ma essendo limitato a un volume molto piccolo riesce ad essere distribuito in maniera del tutto equivalente sia sui bordi di grano sia all'interno del grano. La perturbazione portata da un precipitato molto piccolo può essere sopportata dal reticolo,

Sempre per lo stesso principio, il reticolo tende ad accumulare i difetti tutti in una stessa zona, perché in questa zona c'è un livello energetico diverso e orbitano dalla stabilità ma al di fuori di questa zona il reticolo è stabile.

Ma ~~un~~ ~~ret~~ Consideriamo un reticolo con una distorsione e un difetto intrinseco. Quando c'è la possibilità di diffusione allo stato solido (quindi aumentando la temperatura), il difetto intrinseco si muove all'interno del retico per andare a posizionarsi in prossimità

CARATTERISTICHE MECCANICHE

53

Le curve meccaniche: curve σ - ϵ

- ~~Le curve classiche che applichiamo al provino fino ad arrivare a rottura sono elaborate come prove meccaniche statiche~~
- **Statiche:** quando la sollecitazione viene applicata al provino in maniera gradualmente crescente fino a rottura del provino stesso;
- **Dynamiche:** la sollecitazione viene applicata bruscamente sotto forma di impulso di energia;
- **Di Fatica:** la sollecitazione è applicata ciclicamente per un gran numero di volte fino a produrre, dopo un certo numero di cicli, la rottura.

La fatica è fondamentale per i materiali perché va a ~~essi~~ considerare la risposta del materiale nel momento in cui subisce una sollecitazione ma questa sollecitazione ~~va~~ regolarmente non porta alla rottura del materiale ma viene applicata un numero di volte così elevato da portare il materiale a rottura.

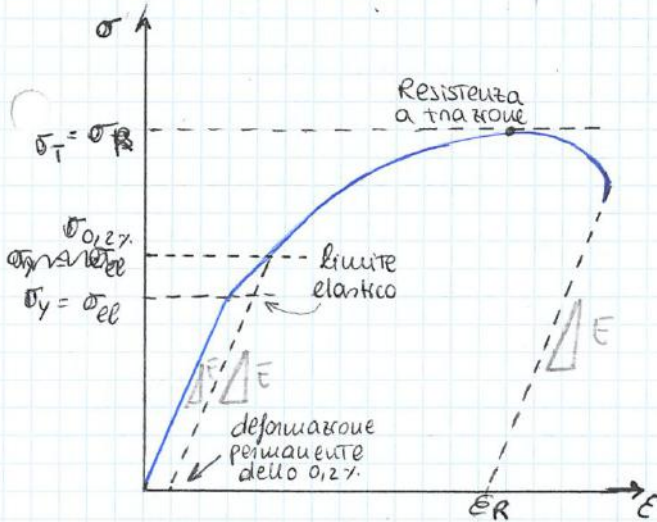
Potenziale di fatica per un materiale non vuol dire portare delle massime possibilità che un materiale ha per resistere o una forza ma vuol dire preoccuparsi nel caso in cui un materiale nel suo ciclo di vita dovrà subire o volte la stessa sollecitazione, se questa può portare alla rottura del materiale stesso.

Approfondita nel capitolo delle Fatiche

Tutte queste tre prove vengono condotte seguendo specifiche normative (EN UNI, ISO, ASTM, ...) che definiscono per ognuna delle prove meccaniche che si possono realizzare sul materiale tutte le condizioni in cui bisogna effettuare queste prove. ~~Questo p~~

Se si esegue la procedura e le condizioni imposte dalla norma, c'è la certezza di aver considerato solo la risposta del materiale. Le norme variano anche in base al materiale.

La curva sforzo deformazione assume questa forma: (PER METALLI)



- Il primo tratto è di deformazione elastica, il materiale subisce una trasformazione reversibile e segue la legge di Hooke e ha andamento lineare.
- Lo sforzo che porta il materiale dalla zona elastica a quella elastoplastica ($\sigma_{al\ limite}$) prende il nome di "limite elastico" σ_y o "limite di snervamento" σ_y .
- A questo punto lo sforzo induce il movimento dislocativo, che continua facendo restringere la sezione portante del materiale.
- La curva comincia a diminuire in corrispondenza della strizione, fino alla rottura. La resistenza a trazione è lo sforzo massimo che posso applicare per mantenere il materiale integro, prima che arrivi a rottura.

In alcuni casi, alcuni metalli, durante la registrazione della curva σ - ϵ , nella zona di passaggio tra tratto elastico e tratto plastico, non hanno un'evidenza netta di distacco dalla linearità. In corrispondenza di questo passaggio si possono essere delle oscillazioni nella curva.

Si è deciso convenzionalmente che come limite elastico si prende lo sforzo corrispondente allo 0,2% di deformazione.

Perciò, se la curva σ - ϵ è una curva perfetta e dimostra con grande evidenza il distacco dalla linearità, prendo lo sforzo nel punto σ_y .

Se invece è una curva con delle oscillazioni, faccio riferimento a $\sigma_{0.2}$.

Oltre σ_R , si forma la strizione, la curva subisce una deflessione.

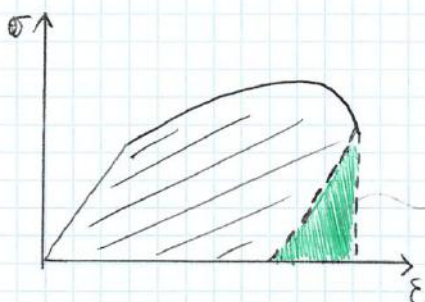
Possiamo misurare la strizione a rottura: $S_r = \frac{A_0 - A_s}{A_0}$. area del materiale giunto a rottura

Il materiale a questo punto non è più completamente integro e la curva subisce una deflessione fino al punto di rottura.

Il punto di rottura non serve a definire lo sforzo massimo, ma la deformazione a rottura.

Tenendo conto della deformazione elastica (non posso proiettare il punto di rottura \perp all'asse x), traccio una retta con lo stesso coeff. angolare (E).

L'ultima informazione che la curva σ - ϵ può dare è l'energia di rottura (lavoro utile per la rottura del materiale rapportato a un'unità di volume).



$$dW = \frac{Fdl}{V} = \frac{Fdl}{A_0 l_0} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{dl}{l_0} = \sigma d\epsilon =$$

= area sottesa della curva

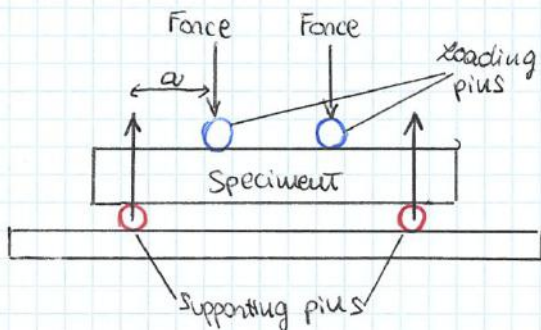
questo triangolo lo recupero perché è dovuto a una def. elastica.

I provini per una prova a compressione non sono ad osso di cane ma sono cubici o cilindrici, che secondo la norma devono avere delle dimensioni specifiche.

Ma la cosa principale è che i cilindri abbiano le due basi perfettamente piane e parallele.

Per la sollecitazione a flessione:

ci possono essere prove di flessione a 3 punti (2 punti per l'appoggio del provino e uno centrale per l'applicazione della forza) oppure a 4 punti (2 punti per l'appoggio e 2 per l'applicazione della forza). In questo caso bisogna caratterizzare le deformazioni nella zona di flessione (situazione mista di compressione e trazione).



4-point Flexure test.

Prova di durezza

Mentre ^{nelle} altre prove applichiamo una forza al campione fino alla rottura, nel caso della prova di durezza non registriamo mai la rottura del campione.

È una prova non distruttiva, può essere utile nel processo di produzione per testare la qualità senza rompere.

Si pensa di diverse tipologie di durezza che differiscono per le diverse punte utilizzate per gli indentatori.

La prova di durezza consiste nel cercare di penetrare la superficie del materiale con un durezza chiamato indentatore e attraverso l'impronta lasciata sul materiale si calcola la quantità di forza da applicare.

Le prove di durezza si differenziano per la punta attaccata all'indentatore

- durezza Brinell **HB** - sfere di acciaio o di carburo di tungsteno (WC)
- durezza Rockwell **HR** - sfere di acciaio o cono di diamante
- durezza Vickers **HV** - piramidi di diamante a base quadrata
- durezza Knoop **HK** - piramidi di diamante a base romboidale

La seconda cosa da sapere:

Di solito si utilizza la HV, in cui l'unità di misura è Kg/mm^2 .
 Per rispettare le convenzioni, dobbiamo ulteriormente dividere per 10.
 E si approssima poi a $\frac{1}{3}$.

$$H \approx \frac{3}{10} \sigma_y \approx \frac{1}{3} \sigma_y \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2} \right]$$

L'impunità è di dimensioni microscopiche perciò non perturba il materiale con il quale si realizza il componente.

Questa prova è utilizzata soprattutto nei controlli qualità durante il processo produttivo, anche se è approssimata, il componente può essere utilizzato anche dopo la prova.

Ogniuna delle 4 prove ha una propria scala, ~~ma non vi è~~
~~corrispondenza tra queste~~ e quindi se vogliamo confrontare due materiali
 su cui sono stati effettuati test diversi, dobbiamo utilizzare queste scale.

Ritorniamo ora alle proprietà specifiche:

la proprietà specifica è una proprietà del materiale rapportata alla sua densità.

Si può parlare di resistenza specifica, limite di snervamento in funzione della densità.

È stato dimostrato che la resistenza ideale di un materiale è

$$\sigma_{ideale} \approx \frac{1}{10} E - \frac{1}{15} E$$

ma questa relazione è un'utopia a causa dell'esistenza dei difetti presenti all'interno del materiale.

•) Sostanza a due componenti (L → S)

6

Ragioniamo, per semplicità, su trasformazioni che avvengono a

○ P atmosferica (escludiamo il fattore fisico P come parametro da modificare, e ragioniamo solo sulla Temperatura).

Vediamo cosa succede a 2 componenti nella trasformazione da fase liquida a fase solida con la possibilità di variazione solo la T.

Ci occupiamo in particolare della trasformazione da L (liquido) a S (solido) perché, nella maggior parte dei casi, quando vogliamo creare una lega partiamo a fusione i ~~materiali~~ due componenti per miscelarli allo stato L. Perciò ci interessa vedere cosa succede abbassando la temperatura, facendo tendere i due sistemi alla solidificazione.

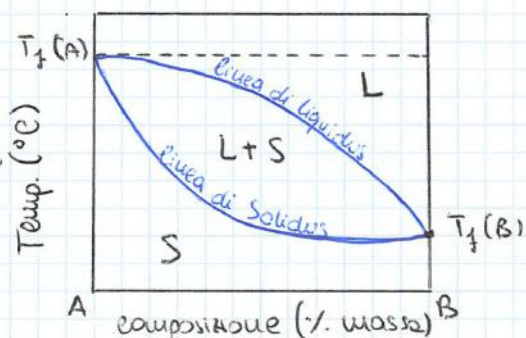
○ Nella trasformazione L → S i due componenti devono essere completamente miscibili allo stato liquido, ma durante il raffreddamento si possono verificare tre situazioni specifiche:

- completa miscibilità allo SS;
- completa immiscibilità allo SS;
- parziale miscibilità allo SS.

- Miscibilità completa allo SL e allo SS.

Allo stato liquido, gli atomi di A e gli atomi di B sono completamente miscelati tra di loro. In una porzione di volume avrò in maniera

○ omogenea, un certo numero di atomi di A e un certo numero di atomi di B. Nel momento in cui comincio a far diminuire la temperatura, si verifica una parziale solidificazione, si forma qualche granello solido mentre parte della soluzione rimane liquida. Più diminuisce la T, più aumenterà la porzione solida e più diminuirà quella liquida. Esiste una zona, con un certo intervallo di T, in cui coesistono SL e SS. Continuando a raffreddare arriverò al punto in cui tutto il sistema sarà solido.



L: soluzione liquida di A e B

linea di liquidus: inizia la solidificazione

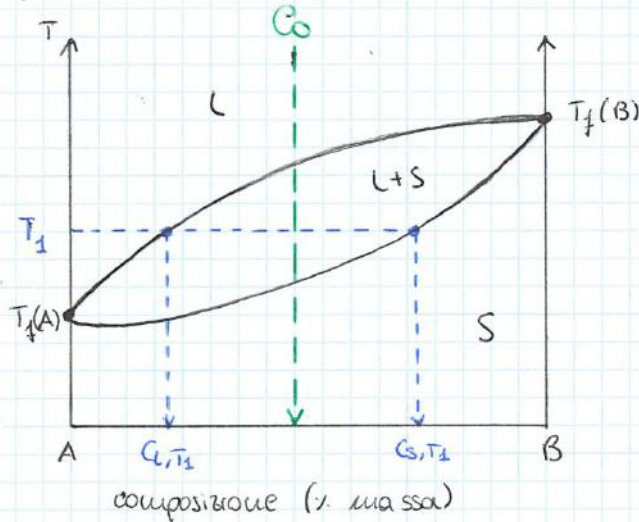
linea di solidus: la solidificazione è completa

S: soluzione solida di A in B o B in A.

il dds ci dice come evolve il sistema al variazione della temperatura, date le % massa dei due componenti.

Le Temperature di Liquidus e di Solidus non sono costanti al variazione della composizione, più aumento la % di B (che per sua natura solidifica a T più bassa), più la T di Liquidus del sistema diminuisce.

Comportamento al raffreddamento; per una composizione specifica (C_0):



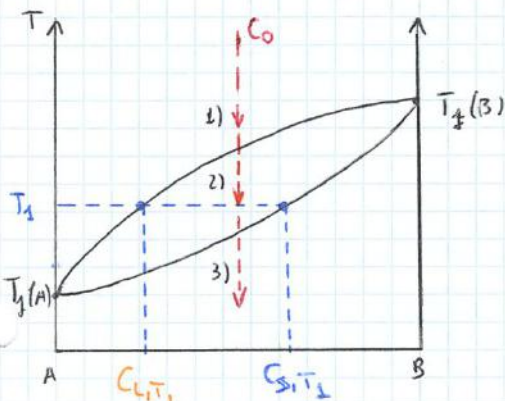
Iniziamo in una condizione in cui il sistema è completamente liquido (al di sopra della linea di Liquidus). Quando C_0 incontra la linea di Liquidus inizia la solidificazione che andrà ad interessare solo una parte del sistema e man mano che abbassiamo la T, la solidificazione riguarderà una parte sempre maggiore di sistema, fino ad avere tutto solido, dopo la linea di Solidus.

L'evoluzione del sistema si deve valutare sia da un punto di vista microstrutturale che composizionale (che non c'è nelle sostanze pure).

In un sistema a due componenti, gli atomi di A e di B in assoluto restano gli stessi, quando inizia la solidificazione, non è detto che il solido che si forma abbia la composizione iniziale. Le percentuali di A e di B nel solido possono essere diverse, nel liquido rimarrà il complementare di A e di B, però quella totale è invariata.

La composizione, quindi, rimane sempre la stessa se considero il sistema complessivo, ma se mi concentro sullo stato (liquido o solido) questa varia.

Analizziamo microstruttura e composizione per C_0 :



- 1) $L(A+B)$
- 2) C_{L, T_1}
 C_{S, T_1}

Liquido composto da A e B con composizione iniziale C_0 . Fino alla curva di Liquidus.

Superata la LL entrano nella zona di solidificazione. Si formano i primi grani di solido.

Avranno composizione diversa da C_0 . La composizione la leggiamo incrociando le due curve.

- ~~Alta~~ Immiscibilità Totale allo SS (immiscibilità completa allo SL)

I diagrammi di stato che prevedono l'immiscibilità totale allo stato solido sono caratterizzati da un punto specifico, detto punto eutettico.

Il punto eutettico è un punto in cui avviene una trasformazione precisa: la transf. eutettica. Questa prevede la trasformazione di un liquido in due solidi con composizione differente. (solido A puro, solido B puro).

NB La trasformazione eutettica avviene solo se ci troviamo in quel punto specifico. Solo se il sistema ha un liquido che si trova alla composizione eutettica ~~nel~~ e alla temperatura eutettica. (come il punto triplo).

ESAME!

Abbiamo due fasi solide distinte: solido A puro e solido B puro.

Nel punto eutettico, oltre alle due fasi solide, si trova anche il liquido.

Per Gibbs: $V = 2 - 3 + 1 = 0$ Nel punto eutettico.

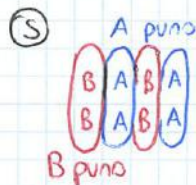
↳ Per mantenere la presenza delle tre fasi non posso variare la temperatura.

=> La trasformazione eutettica è isotermica!

Il liquido che si trova alla comp. e Temp. eutettica tende a solidificare ma dato che allo SS A e B sono immiscibili, vanno a solidificare formando delle lamelle, alternate di A puro e B puro.

Transf. Eutettica: $L \Leftrightarrow$ Solido A puro + Solido B puro

L(A+B)



Formazione di struttura eutettica a lamelle alternate di A puro e B puro.

Essendoci di fronte allo stato solido, non posso pensare che A e B solidifichino separatamente.

Nel dds conosco le T di fusione di A e B, la composizione del punto eutettico e la T della transf. eutettica.

Con questi dati si può costruire il dds ~~il diagramma~~ di due componenti completamente miscibili allo SL ma totalmente immiscibili allo SS.

- Miscibilità Parziale allo stato Solido

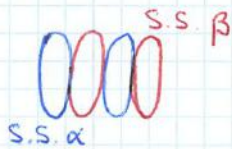
Due componenti completamente misubili allo SL (unica fase) ma parzialmente misubili allo SS. Questo vuol dire che in alcune condizioni, i due componenti riescono ad essere misubili anche allo SS, in altre condizioni si separano nettamente. C'è un confine tra queste due situazioni.

~~In una~~ Un certo numero di atomi di B si inserisce nel reticolo di A, formando la soluzione solida α .

Allo stesso modo, nella zona in cui prevale B, un certo numero di atomi di A si inserisce nel reticolo di B creando la soluzione solida β .

In mezzo c'è una regione bifasica con due ~~soluzioni~~^{fasi} solide, non costruite però da componenti puri ma dalle due soluzioni solide (α e β) che convivono in quella zona ed essendo immisubili non formano un solido con composizione unica.

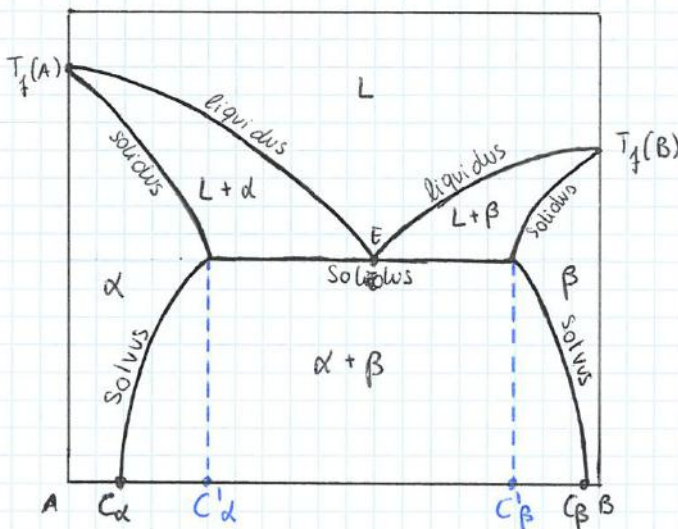
Quando andiamo ~~verso~~^{verso la} zona con le due soluzioni solide immisubili, troviamo nuovamente la trasformazione eutettica. Alla T_E e C_E il liquido forma un solido lamellare, ma questo non sarà più composto da lamelle di componenti pure ma da lamelle alternate di soluzione solida α e soluzione solida β .



$L \Leftrightarrow SL_2 \text{ sol. } \alpha + SL_2 \text{ sol. } \beta$

Formazione di struttura eutettica a lamelle alternate di α e β .

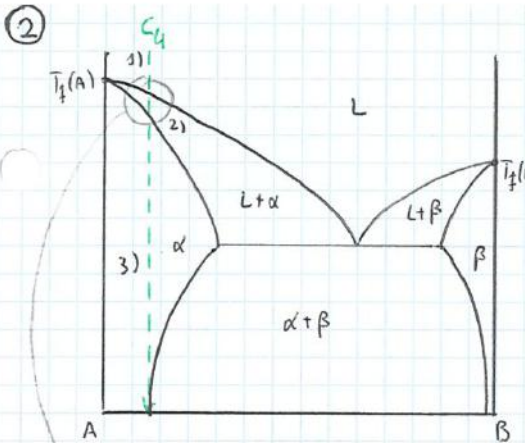
Dal punto di vista microstrutturale è identico al caso precedente, quello che cambia è la composizione delle lamelle.



Nel momento in cui ho il reticolo 100% e inizio ad aggiungere atomi di B, questi si piazzano nel reticolo di A formando la SL₂ sol. α .

Continuando ad aumentare gli atomi di B, questi arriveranno a un limite oltre il quale non riusciranno più a inserirsi nel reticolo di A ma nentano da ponte e diventano la precestrale prevalente in cui si

inserisce qualche atomo di A per dare la SL₂ solida β . Questo "limite" è il "limite di solubilità" della SL₂ solida.

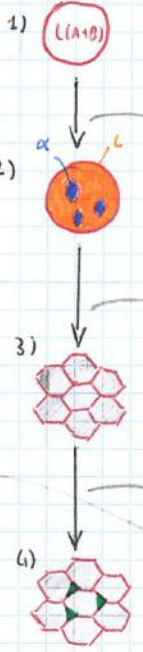
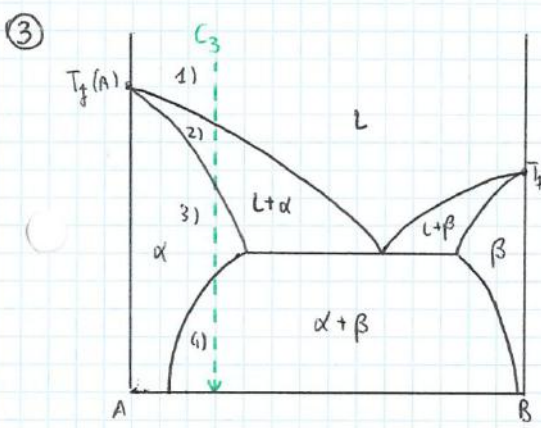


Sistema completamente liquido fino all'incrocio con la curva di liquidus. All'incrocio con la curva si forma il primo granello di solido. Superata la li.d. L., attraversiamo la regione bifasica L+alpha, in cui al diminuire della T, aumenterà la porzione di solido e diminuirà quella del liquido. La comp. del liquido ~~diminuisce~~ ^{varia} l dipende se mi riferisco ad A o a B e la leggo sulla curva di liquidus. Superata la curva di solidus il sistema diventa tutto solido. Granuli di soluzione solida alpha di composizione C_4.

Le composizioni di liquido e solido si modificano seguendo le rispettive curve. Non posso dire se aumenta o diminuisce a priori perché non mi riferisco ad A o B ma a soluzioni alpha o beta.

tutto liquido rimane un granulo
diminuisce la parte di liquido e aumenta quella di solido
tutto solido con una goccia di liquido

NB [alla T_E non succede nulla perché il sistema è già tutto solido. La transf. eutettica avviene solo in presenza di liquido.]

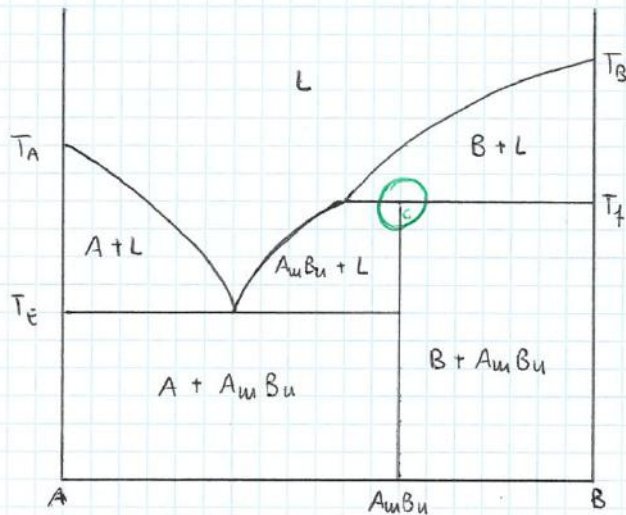


Sistema compl. liquido di comp. C_3 in cui A e B sono compl. miscibili. Incrociamo la curva di liquidus. Si formano i granelli di solido alpha (come prima). Superata la curva di solidus (come prima) sistema tutto solido a quella composizione C_3 (unica fase). Incrociamo la curva di solvus. * Gli atomi di B non trovano più posto nel reticolo, raccolgono nel reticolo qualche atomo di A e si forma la str. solida beta. -> si formano precipitati di fase beta a bordo grano. il precip., essendo formato a una T inferiore rispetto a quella in cui si è verificata la solidificazione, viene chiamato beta secondario.

* Stando abbassando la T, il reticolo tende a ~~deformarsi~~ gli interstizi diventano sempre più fini e sempre più vicini alla condizione ideale. Non c'è spazio per atomi di B che a T maggiori trovavano spazio (la solub. diminuisce).

il precipitato cambia in quantità e composizione, seguendo l'andamento delle curve di solvus.

- A Fusione Incongruente



Partendo da una sostanza solida e riscaldando, non ho la trasformazione in liquido, ma superata la T_f (Temp. di fus. incongruente) si forma un liquido ma in presenza di un solido che però ha una composizione diversa dal solido di partenza.



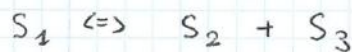
↓
Punto Peritettico

Anche questa trasformazione (nel punto peritettico) è una transf. invariante. Per la regola di Gibbs ho $V=0$.

Trasformazione che avviene a una specifica composizione e temperatura (stessa cosa del punto eutettico).

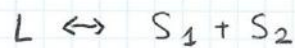
Si può definire un'altra trasformazione, detta EUTETTOIDICA.

Valgono le considerazioni sopra descritte (invariante, a una determinata temperatura e composizione) e riguarda tre fasi solide distinte:

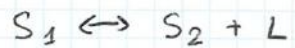


Anche in questo caso ci sarà una struttura lamellare, con lamelle alternate di Solido 2 e Solido 3.

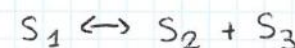
Trasformazione EUTETICA



Trasformazione PERITETICA



Trasformazione EUTETTOIDICA



} NO esame.

DUTTILITÀ

Abbiamo già visto che la duttilità, per quanto riguarda i materiali cristallini, è legata al movimento dislocativo, e che

Abbiamo anche visto che i difetti si concentrano tutti in una zona del reticolo e che quindi anche gli altri difetti presenti nel materiale possono interagire con il moto dislocativo.

Questa influenza, interviene sulle proprietà macroscopiche del materiale.

In generale, questa interazione porta a un "bloccaggio" del moto dislocativo, ovvero gli altri ~~difetti~~ difetti rappresentano un ostacolo che la dislocazione deve superare per proseguire nel suo moto e arrivare al termine del reticolo.

Tutto questo si traduce, macroscopicamente, nella variazione di due caratteristiche specifiche del materiale: ~~da~~

- da una parte, avere le dislocazioni ostacolate vuol dire far diminuire la duttilità del materiale (il materiale duttile subisce una trasformazione irreversibile perché le dislocazioni si muovono);
- allo stesso tempo, perdendo proprietà meccaniche come la duttilità, il materiale diventa più resistente. Può sopportare quindi sollecitazioni maggiori e non avrà ~~la~~ molta possibilità di deformarsi plasticamente quindi tenderà a un comportamento più fragile.

Quando la dislocazione si muove, c'è rottura e formazione istantanea di legami. Anche se non è necessariamente vero che questa si muova:

c'è bisogno di una forza aggiuntiva (forza di taglio) che bilancia una forza opposta (quella che tiene la dislocazione bloccata).

I reticoli cristallini si oppongono al moto dislocativo con una forza che possiamo assimilare a una forza di attrito.

Nel momento in cui applichiamo una forza di taglio, la dislocazione potrà muoversi solo dal momento in cui questa sollecitazione esterna supera la resistenza del reticolo al movimento dislocativo.

Chiamo f questa forza di attrito, riferita a una lunghezza unitaria.

La dislocazione, quindi, si muoverà in linea retta lungo un piano di scorrimento, percorrendo la distanza L_2 .

(Dislocazione di lunghezza L_1 che percorre una distanza L_2).

Come conseguenza, produce lo scorrimento della parte superiore del cristallo di una distanza b relativamente a quella inferiore.

Tutti gli atomi che si trovano attorno al vertice del semipiano aggiuntivo vanno a trovarsi in una condizione energetica lontana da quella minima E_0 .

Ci sono atomi in compressione nella zona in cui si è il semipiano aggiuntivo e atomi in trazione nella zona ~~non~~ del reticolo non interessata dal semipiano aggiuntivo (devono allontanarsi dalla loro distanza di legame ideale per accomodare la fila di atomi a cui appartengono).

Questo vuol dire che tutti gli atomi vicini al vertice della dislocazione hanno un'energia potenziale diversa da E_0 (in particolare questa energia è $> E_0$).

Per mantenere l'energia potenziale del cristallo più bassa possibile, il reticolo fa in modo che la dislocazione sia la più corta possibile, in modo che lo stato perturbato interessi il numero minore di piani.

(Si comporta come se le fosse associata una tensione lineare)
Questo ci permette di trattare la dislocazione come se fosse una tensione lineare.

↳ Possiamo vedere la tensione lineare T come un'energia per lunghezza unitaria e la possiamo approssimare a

$$T \approx \frac{1}{2} \epsilon b^2 \quad (\epsilon = \text{Modulo di Young})$$

Questa influenzerà l'interazione della dislocazione stessa con gli altri difetti (ostacoli).

Più l'energia associata alla dislocazione sarà elevata, più favorirà la sua tendenza a muoversi.

Se non ci sono difetti:

L'unica forza che si oppone al movimento della dislocazione è la forza di attrito del reticolo f .

Ma questa forza f , si modifica al variare del reticolo che stiamo considerando.

- Ragionando su metalli puri (senza difetti puntuali), ci sono solo atomi metallici che si legano tra loro attraverso legami metallici adirezionali che si oppongono debolmente al moto dislocativo (proprio per l'adirezionalità). Questo conferma il fatto che i metalli puri sono materiali molto teneri (facilmente deformabili in maniera irreversibile), il reticolo ha una resistenza intrinseca molto bassa (f_i)

- Per i ceramici, invece, a causa del legame covalente (direzionalità) o ionico (attrazione e repulsione delle cariche) il moto dislocativo è impossibile. La tendenza di resistenza del reticolo si traduce in un'altissima

Sulla linea di dislocazione abbiamo una forza di bloccaggio che il difetto può sostenere, ma che dipenderà dal numero di difetti che interagiscono con la dislocazione.

Se ogni difetto ~~sa~~ potrà sostenere una forza di bloccaggio p , il contributo complessivo sarà una forza rapportata al numero di difetti che la dislocazione incontra, definendo quindi

$$f = \frac{P}{L}$$

Considerando anche lo sforzo di taglio necessario per far muovere la dislocazione e quindi il contributo aggiuntivo ~~dato~~ a τ , definiamo un $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \frac{f}{b} = \frac{P}{Lb}$$

Sia il difetto che le dislocazioni comportano una modifica del reticolo ma prima che avvenga il moto dislocativo, queste variazioni possono essere annullate se opportunamente trattate quindi sono delle variazioni elastiche.

La deformazione che il reticolo subisce a causa della presenza del difetto è una deformazione elastica, diventa plastica solo nel momento in cui la dislocazione si muove.

Per ogni ostacolo, a causa del fattore di bloccaggio p , il bloccaggio aumenta di un fattore Eb^2 .

Lo sforzo di taglio complessivo da applicare per far muovere una dislocazione in presenza dei difetti, ~~oss~~ dipenderà dal modulo di Young, dallo spostamento, dal numero dei difetti che la dislocazione incontra $1/L$ e da un fattore α che terrà conto della resistenza specifica ~~del~~ a seconda del difetto considerato.

$$\tau = \frac{\alpha Eb}{L}$$

α è una costante adimensionale che caratterizza la resistenza dell'ostacolo.

Per ogni meccanismo ~~Tutti~~ e quattro i meccanismi comportano un aumento della resistenza ma al tempo stesso la dislocazione non avrà la possibilità di percorrere tutta la lunghezza L_2 che percorreva quando non ci erano ~~ostacoli~~ ostacoli. La duttilità e la def. plastica diminuiscono (a livello macroscopico).

Passando da un metallo puro a una sua lega si ha un aumento della resistenza a rottura e un passaggio da zona elastica a plastica con sforzi maggiori.

Il tratto elastico della curva σ - ϵ si modifica:

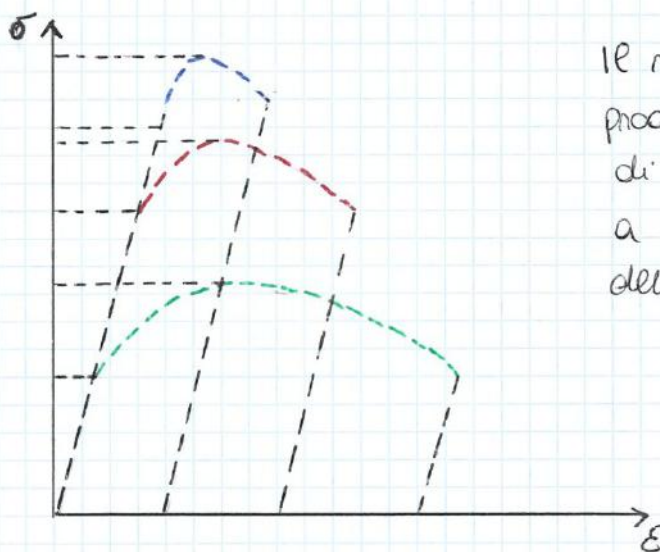
- il limite di snervamento aumenta;
- la pendenza della retta ~~vera~~^{NON} modifica perché:
 - nel ~~intorno~~ di un soluto con la dislocazione il modulo di Young E , unicamente, dipende dalla curva di CM e dagli atomi.
 - La dislocazione, nel complesso del reticolo, non influisce sulla distanza di legame, perché agisce localmente.

ESAME! Il moto dislocativo è stato associato alla deformazione plastica, non elastica. Tutte le conseguenze del moto dislocativo non hanno effetto sul tratto elastico della curva.

Partendo dalla curva σ - ϵ del metallo puro, passare ad una sua lega vuol dire aumentare il limite di snervamento, la resistenza a rottura ma ho sempre la stessa pendenza.

Bloccando le dislocazioni, si ~~min~~ lo scorrimento che portava alla deformazione plastica avviene in maniera più limitata e si misura una deformazione a rottura più esota \Rightarrow il tratto parabolico della curva σ - ϵ tende a valori maggiori di resistenza e si restringe nel riferimento alla deformazione che il materiale può subire prima di giungere a rottura.

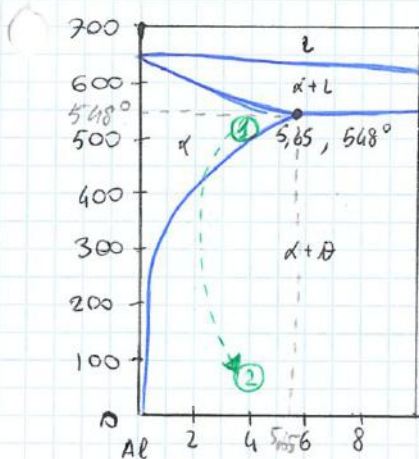
All'aumentare della quantità di soluto si hanno resistenze sempre maggiori ma duttilità sempre minore.



Il rafforzamento per soluzione solida produce un aumento del limite di snervamento e della resistenza a rottura, con una riduzione della duttilità.

Uno degli esempi di dds che porta alla presenza di precipitati è Al-Cu. 8

Al e Cu hanno alta solubilità a T sufficientemente elevata.



Al e Cu hanno alta solubilità a T sufficientemente alta. La linea di solvus è quasi prossima a Al puro, perciò partendo da una base minima % di Cu fino ad arrivare al ~~5,65%~~ 5,65% abbiamo per $T \sim 550^\circ\text{C}$ la possibilità di avere un'unica fase α in cui Al e Cu sono completamente miscibili. Quando x diminuisce la T, per queste composizioni, si attraversa la curva di solvus e si crea la fase θ (composto CuAl_2 - composto intermedio).

Abbassando la temperatura, si forma a bordo grano una serie di precipitati.

Si possono avere precipitati di forma differente a seconda del raffreddamento. I dds, come già visto, valgono per trasformazioni in equilibrio. Il sistema necessita ~~di~~ di un certo tempo per arrivare all'equilibrio e questo di solito avviene con un raffreddamento lento.

In questo caso, il passaggio da ① a ②, nel momento in cui avviene per raffreddamento lento, vuol dire avere un sistema in cui tra i grani della fase α già presenti si creano dei precipitati di fase θ , che si concentrano in una zona già perturbata: bordi di grano.

In questo caso, i precipitati avranno dimensioni relativamente grandi (μm).

Non seguendo le condizioni di equilibrio, si fa un raffreddamento rapido, per esempio in una tempera:

il materiale nel punto ① (soluzione solida α), viene recuperato dal forno in cui ha una temperatura di 520°C e viene raffreddato con getti d'aria o buttato in acqua. All'interno del sistema, gli atomi non hanno il tempo di sistemarsi e si blocca la diffusione allo stato solido. I precipitati che si creano, sono bloccati all'interno del reticolo \Rightarrow soluzione soprassaturata.

La condizione, di nuovo, non è stabile ma metastabile.

La condizione di soprassaturazione, lontana dallo stato ideale, porta piano piano alla formazione di precipitati.

Dal dds i precipitati dovrebbero formarsi attorno a 500°C ma con la tempera, con l'invecchiamento, anche a 25°C si arriva alla formazione di precipitati che però non si concentrano lungo i bordi grano \Rightarrow

3) Rafforzamento da Bordi di Grano

La dislocazione interagisce con un bordo di grano.

~~Quando la dislocazione si muove in un grano~~

A bordo grano ci sono delle condizioni di ~~instabilità~~ ^{instabilità} del reticolo, il procedere della vacanza non può procedere con la stessa velocità perché viene a mancare (vacanza) o è più lento uno degli atomi principali.

Ma mano che le dislocazioni si muovono all'interno del grano, arrivano a bordo grano e si bloccano, non hanno la possibilità di andare nel grano successivo a causa del disordine presente in questa zona.

Oltre al blocco legato ai difetti, può capitare che il piano di scorrimento non abbia la direzione preferenziale di scorrimento nell'altro grano.

Però le dislocazioni si concentrano a bordo grano permettendo di usare queste zone per rafforzare il materiale.

In questo caso, il contributo di taglio che deriva dal bordo di grano viene misurato attraverso una costante $k_p = \text{costante di Petch}$, rapportata a \sqrt{D} , dove D è il diametro dei grani:

$$\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$$

Questo effetto dipende quindi tantissimo dalla dimensione del grano.

Se $D = 1 \div 100 \mu m$, τ_{gb} è piccolo, trascurabile.

Se $\left. \begin{array}{l} D < 1 \mu m \text{ (microcristallini)} \\ D \rightarrow 1 \mu m \text{ (macrocristallini)} \end{array} \right\} \Rightarrow \tau_{gb} \text{ diventa significativo.}$



I materiali nano/micro cristallini hanno i vantaggi meccanici.

Per questi materiali vale la Relazione di Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_{monon.} + k_p D^{-1/2}$$

Il limite di snervamento di un materiale nanocristallino è uguale a quello del microcristallino più un contributo k/\sqrt{D} .

~~Quando la dimensione del grano~~

Possiamo avere un grano grande  o tanti grani piccoli ,

la superficie di un'unica sfera grande è numericamente più piccola della superficie di tante sfere piccole che occupano lo stesso volume.

Più le sfere sono piccole, più aumenta la superficie complessiva, più aumentano i bordi di grano. La dislocazione avrà poco spazio per muoversi e tanti bordi di grano che potranno bloccarla.

Il termine "a freddo" non indica che la lavorazione viene effettuata a temperatura ambiente, ma che la temperatura è più bassa di quella di ricristallizzazione.

Il range di temperatura è circa $(0,3 \div 0,5)T_f$, il materiale è solido ma siamo comunque a T più elevate di quella ambiente.

Nel momento in cui il materiale è costretto ad attraversare questa zona di un determinato spessore lasciato dai rulli, la microstruttura passa da grani di forma "equiasica" (più o meno le stesse dimensioni in tutte le direzioni) a grani completamente allungati nella direzione di laminazione. Per assecondare questa variazione di spessore, il grano viene deformato, ~~si~~ risulta schiacciato nella direzione perpendicolare e quindi si allunga nella direzione di laminazione.

In queste condizioni, si modifica la forma dei grani inducendo un fenomeno di anisotropia ma, ~~occorre~~ all'interno di ogni grano, si verifica la formazione di nuove dislocazioni.

In grani equiasici le dislocazioni possono essere all'interno dei grani ma in numero limitato. Nel passaggio alla struttura dopo la lavorazione, il numero di dislocazioni è aumentato esponenzialmente.

La deformazione plastica a freddo porta alla formazione della foresta di dislocazioni.

Considerando la densità di dislocazioni (ρ_d) come la lunghezza di linea di dislocazione per il volume unitario è stato dimostrato che in un metallo puro, dopo il trattamento termico si nota una $\rho_d = 10^{10} \text{ m/m}^3$.

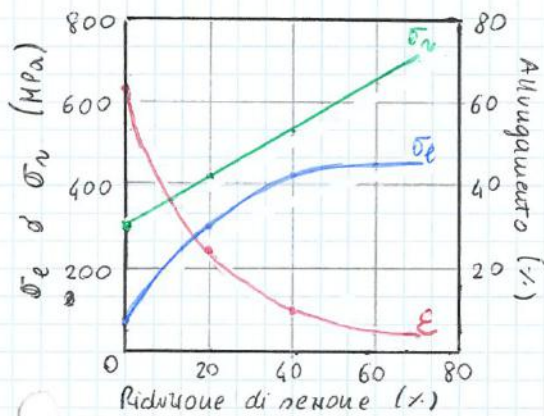
Lo stesso metallo, dopo la lavorazione ^{per deformazione} plastica a freddo raggiunge $\rho_d = 10^{17} \text{ m/m}^3$.

Durante la lavorazione per laminazione, a livello atomico un reticolo scende rispetto all'altro ed è più facile la creazione di semipiani aggiuntivi e quindi le dislocazioni.

La dislocazione non è lungo il piano di scorrimento, ma è una linea inclinata delle dislocazioni perpendicolari, quindi diversi semipiani aggiuntivi, formati a seguito della modifica del grano. ~~Per questo~~
Fino a quando siamo nella zona del semipiano il meccanismo ABC

all'area iniziale, moltiplicando tutto $\cdot 100$, si indica la % di lavorazione effettuata.

Al diminuire della sezione, aumenta la resistenza, il limite di snervamento σ_{el} , resistenza a rottura σ_r ma ovviamente ci sarà una riduzione dell'allungamento.



Partendo da un metallo con una certa sezione, limite elastico $\sigma_e = 80$ MPa, resistenza a rottura $\sigma_r = 300$ MPa. Su quella lamina, per indurre una deformazione plastica per ridurre la sua sezione, ~~si applica una sollecitazione~~ i nuovi sforzi applicati una sollecitazione sicuramente al di sopra del limite elastico (per indurre la deformazione plastica), ma non si deve superare il limite di rottura.

Immaginando di applicare una sollecitazione di 150 MPa e che la sezione si sia ridotta del 20%, ~~avrà~~ il materiale avrà $\sigma_e' = 300$ MPa, $\sigma_r' = 400$ MPa, continuando ad applicare sempre 150 MPa, non si deforma più perché il suo limite elastico è aumentato, arrivando a 300 MPa.

Bisogna cambiare la sollecitazione in modo che sia superiore al limite elastico ~~se~~ si vuole ulteriormente ridurre la sezione.

Applicando quindi $\sigma'' = 350$ MPa (notare che $\sigma_e' < \sigma'' < \sigma_r'$), si arriva al 40% di riduzione di sezione. ~~Elasticità~~ $\Rightarrow \sigma_{el}'' > 400$ MPa. Continuando ad applicare 350 MPa si cade nel campo elastico.

Il grafico ci dice anche che, ~~ris~~ al 40% di sezione ridotta, la deformazione possibile è solamente di 10%: il materiale si è rafforzato ma ha perso in duttilità. Per volere la deformazione ancora del 10%, bisognerebbe applicare una sollecitazione di 500 MPa.

\Rightarrow Non conviene, e non è sempre possibile, continuare a ridurre la sezione della lamina in maniera interrottta, per ogni sollecitazione bisogna valutare i nuovi valori di σ_e , σ_r e la duttilità che il materiale ancora mantiene.

La curva σ - ϵ continua a modificarsi man mano che la percentuale di lavorazione aumenta, ma deve essere tenuto in conto man mano che la lavorazione continua. Si rischia di applicare una sollecitazione troppo bassa, non inducendo deformazione plastica, o troppo alta, rompendo il materiale.

Quando i due principi in un'unica operazione si ottiene la lavorazione a caldo = invecchiamento + ricristallizzazione.

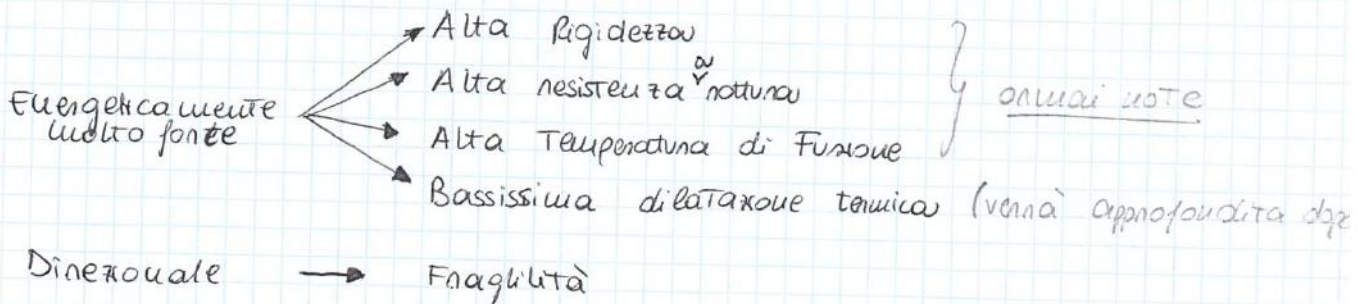
Si applica una sollecitazione attraversando i nodi, i grani equivalgono a allungano, si creano le dislocazioni, la Temperatura (= temp. di ricristall.) non appena i grani si allungano, i nodi si riorganizzano in modo da annullare le dislocazioni e ricreare i grani piccoli e successivamente, attraverso l'accrescimento dei grani, il materiale torna alla microstruttura iniziale ma con sezione ridotta.

Si può ricominciare con la lavorazione perché il materiale ha tutta la duttilità dell'inizio e necessita di una resistenza molto piccola per variazione la sezione

[25/11] * ESERCITAZIONE RESISTENZA * + resistenza materiali
~~Alcuni classi di materiali fragili $\sigma_y = \sigma_{cr}$ per materiali duttili $\sigma_y = \sigma_{cr}$.~~

MATERIALI CERAMICI

La presenza di legami covalenti e ionici porta un'energia molto elevata.



Elettroni non liberi → Pessimo conduttore termico } buon isolante.
 → Pessimo conduttore elettrico

Deformazione: - Deformazione elastica.

Pancone di elevata rigidità vuol dire avere valori di modulo di Young elevati:

da Diamante ~ 1000 GPa
 a Zirconia ~ 200 GPa

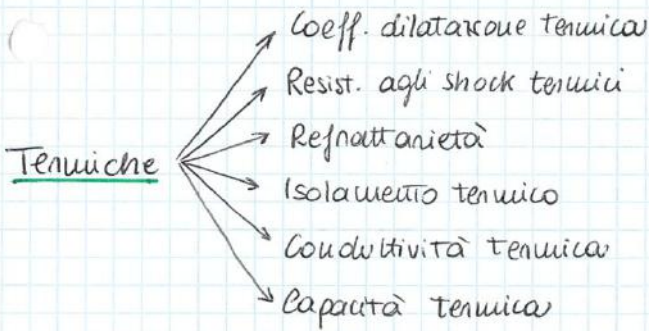
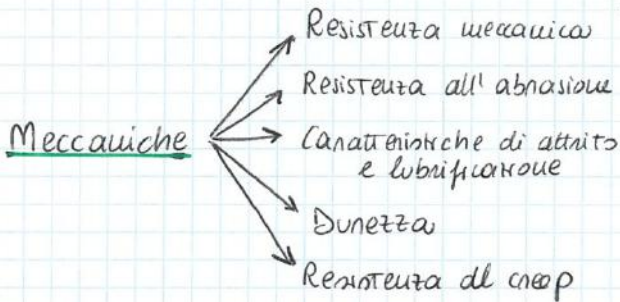
Alta resistenza quindi elevata durezza, misurata con Durezza Knoop (HK)
 da Diamante ~ 7000 HK (cristallini)
 a Vetro di Silice ~ 550 HK (amorf).

La curva sforzo deformazione è rappresentata dal solo tratto elastico: netto (per tutte le trasformazioni vale Hooke) fino a rottura. Hanno un comportamento del tutto fragile.

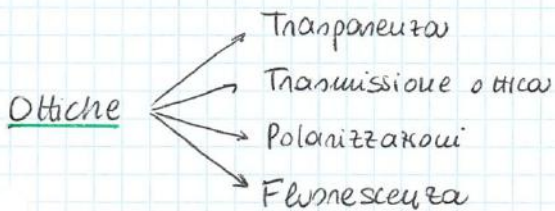
Ceramici Ingegneristici:

Sviluppati recentemente per applicazioni più sofisticate ed ai quali, pertanto, sono richieste proprietà superiori e maggiore affidabilità.

Analizziamo le principali funzioni e proprietà:

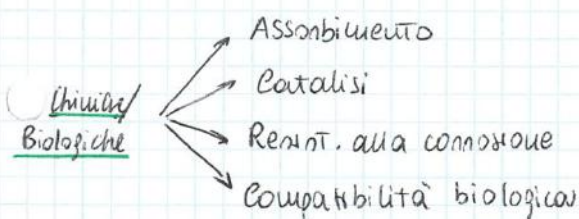


Applicazioni che riguardano in ambito protettivo di altri materiali che devono funzionare ad alte T.



Applicazioni come Sensori.

capacità di convertire energia meccanica in elettrica e viceversa



Alta inerzia chimica, posso lavorare in ambienti chimici aggressivi. Manufatti catalitici / protettive ossa, denti, ecc nel corpo umano.

La FORMATURA

Processo tramite il quale si conferisce all'impasto la forma del prodotto, applicando una pressione sufficiente a deformatelo plasticamente e stabilmente.

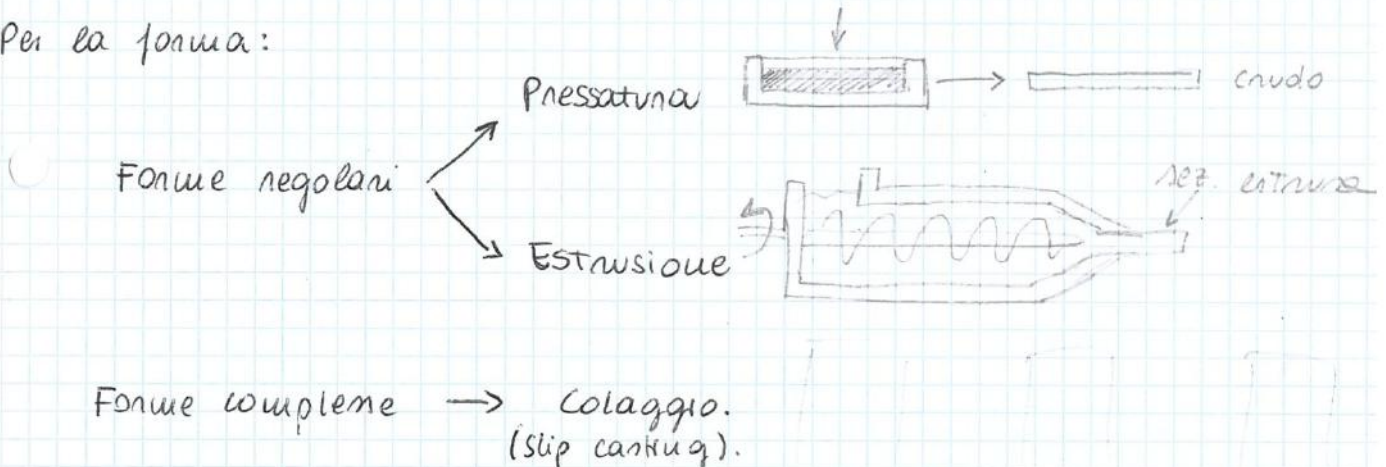
Il prodotto formato deve avere una resistenza tale da sopportare il proprio peso e la sua movimentazione.

Esistono diverse tecniche di formatura, catalogate in tre famiglie:

- 1) Getto - Casting: la formatura avviene inserendo la polvere in un mezzo liquido ~~con~~ con percentuale di acqua fino al 35%.
La tecnica utilizzata è Slip casting.
- 2) Idro-plastico: polveri in mezzo plastico con % di acqua fino al 20%.
La tecnica utilizzata è estrusione e iniezione.
- 3) A secco: polveri in un mezzo secco/semisecco con % di acqua fino al 10%.
La tecnica utilizzata è la Pressatura.

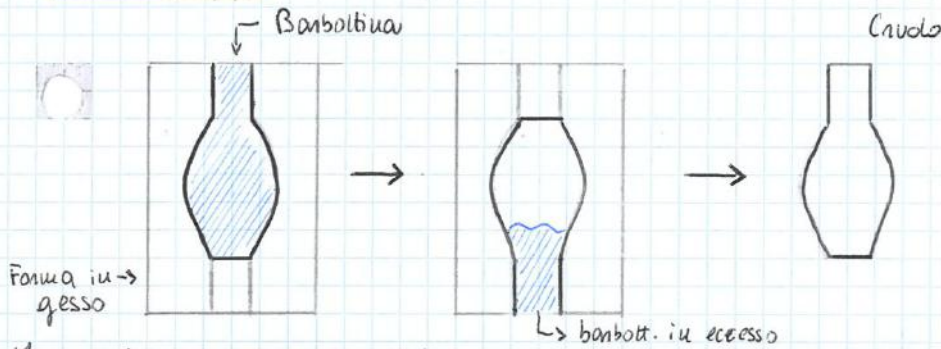
La scelta di un processo dipende dalla quantità di acqua che si può utilizzare, dai volumi produttivi (pezzi da produrre in un'ora) perché alcuni processi richiedono più tempo, dalle dimensioni e la forma del prodotto finale.

Per la forma:



Analizziamo questi tre processi nello specifico:

Il Colaggio



La polvere ceramica dalla quale partiamo viene miscelata con una percentuale di 30 ÷ 40 % di acqua.

Una quantità di acqua così grande è necessaria perché, dovendo colare il colaggio nelle forme molto complesse, c'è bisogno di un materiale di partenza molto fluido, deve riuscire a riempire tutto lo stampo anche in forme complesse.

All'interno dello stampo, però, ci sarà sia polvere che acqua e bisogna poter eliminare l'acqua.

Non si può procedere per evaporazione attraverso un'apertura sullo stampo perché sarebbe un processo troppo lungo e lento.

Si utilizzano, perciò, degli stampi porosi (normalmente realizzati in gesso o con polimeri) e attraverso questi pori l'acqua può evaporare.

Questa è l'unica tecnologia che consente di realizzare componenti cavi: si sfrutta l'evaporazione, quindi la parte più essicata del componente, prossima alle pareti dello stampo.

Quando la parte essicata raggiunge lo spessore voluto, si leva il resto della bambottina in eccesso per ottenere il componente cavo.

Oltre all'acqua si possono aggiungere altre sostanze, quali dispersanti (per evitare la non formazione particelle ceramiche), defloccolanti (per evitare la flocculazione), plastificanti (di natura polimerica e servono ad aumentare la resistenza del crudo).

Una volta data la forma al componente (con una delle tre tecniche viste), all'interno ci sono ancora dei residui di acqua, in quantità diverse in base alle varie tecniche.

Si deve procedere all'essiccazione completa.

