



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1878A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Gregnol Gianluca

MATERIA: Scienza e tecnologia dei materiali - con esercitazioni e riassunti - 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

Indice

- Classificazione dei materiali
- Densità e modulo elastico
- Oltre l'elasticità: la duttilità
- Diffusione allo stato solido
- Difetti di linea: dislocazioni
- Difetti tridimensionali: porosità, inclusioni, precipitati
- Diagrammi di stato
- Prove meccaniche
- Ruolo dei difetti sulla duttilità dei metalli
- Frattura e tenacità a frattura
- Carichi ciclici: la fatica nei materiali
- Materiali ceramici
- Materiali polimerici
- Materiali e calore
- Materiali ed alte temperature operative
- Grafici riassuntivi: di metalli, ceramici, polimeri
- ESERCITAZIONI
- Riassunti degli argomenti principali

Scienze e tecnologie dei materiali

①

• Cos'è un materiale?

è un solido in grado di svolgere almeno 1 funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, ...)

• Le famiglie principali di materiali sono

- Metalli
- Ceramici e vetri
- Compositi
- Polimeri ed elastomeri

• Classificazione

- Naturali → origine geologica o chimica
- Sintetici → ottenuti con trattamento

• Per la scelta del materiale devono anche essere considerati i processi produttivi che portano alla formazione di questo (energia di produzione, scarti, impatto ambientale, scopo, ...)

• I processi produttivi sono in grado di variare le proprietà del materiale.

Si distinguono:

- processi primari → impartiscono una forma
- processi secondari → modificano geometria e proprietà (interne del materiale)

Classificazione dei materiali

• Metalli (materiali inorganici metallici)

- Gruppo caratterizzato da un $\#$ variabile di e^- di valenza delocalizzati (legame metallico)
- L'organizzazione degli atomi è composta da strutture ordinate (quando un materiale ha tale caratteristica si parla di materiali cristallini)
- Le leghe sono invece strutture composte da combinazioni di 2 o + metalli/non metalli, come le ghise o gli acciai, ...

Nel particolare:

Acciai → Fe + C

Ghise → Fe + C con % diverse tra i 2

Ottone → Cu + Zn ; Bronzo → Cu + Sn

⑥ Fragili → deformazioni elastiche (resistono senza deformarsi, ma poi crack!) ②

⑦ Formata prevalentemente da polveri (da fuso solo per vetri)

• Polimeri (materie plastiche)

- Costituiti da lunghe catene molecolari (macromolecole), nelle quali 1 o + gruppi si ripetono concatenandosi (monomeri)

- Costituiti da C + H però altri contengono anche O, N, F.

- Vengono legati dai legami intra-catena → forti (tipologia: covalenti)

intercatena → deboli (tipologia: Van der Waals)

- Le proprietà variano molto da famiglia a famiglia:

- Ci sono 3 sottoclassi:

• TP (termoplastici) → duttili

• TI (termoindurenti) → fragili

• Gomme (elastomeri) → deformazione elastica molto elevata.

- In generale si può dire che sono caratterizzati da:

① ρ bassa

② facilmente deformabili

③ bassa resistenza meccanica

④ bassa temperatura di decomposizione o fusione (rammolimento)

⑤ Alta reattività chimica

⑥ Riciclabilità a fine vita (TP)

• Compositi

- Sono una composizione di 2 o + materiali ≠, al fine di accoppiarli per ottenere le migliori caratteristiche di ciascuno. → Matrice + Rinforzo

(nota: il legno è stato definito un composito naturale)

- Anche qui, essendo le combinazioni le più disparate, le proprietà sono molto variabili. Un esempio di composito è la vetroresina, caratterizzata da elevata resistenza a trazione e notevole duttilità e flessibilità

- Tipi di composito

CMC, MMC, PMC, GFR (fibre di vetro), CFR (fibre di carbonio), Aramidiche

A livello atomico/molecolare si distinguono legami chimici di \neq tipo: (3)

- Legami forti $\left\{ \begin{array}{l} \text{Covalente} \\ \text{Ionico} \\ \text{Metallico} \end{array} \right.$ - Legami deboli - dipoli

Analizziamo ora i \neq tipi di legame

• **Legame metallico** \rightarrow metalli

È un legame energeticamente forte ed adirezionale (non richiede angoli specifici). Gli atomi sono disposti in modo ordinato, e la sua caratteristica è la presenza di una nube di elettroni liberi. Per rompere i legami è richiesta molta energia. A causa della sua forza si ha che il materiale avrà:

medio-alta $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rigidità} \\ \text{Resistenza a rottura} \\ T \text{ di fusione} \end{array} \right.$

bassa dilatazione termica

A causa dell'adirezionalità del legame, i materiali sono duttili. Grazie agli e⁻ liberi i materiali sono ottimi conduttori di $\left\{ \begin{array}{l} \text{calore} \\ \text{elettricità} \end{array} \right.$

• **Legame covalente** \rightarrow ceramici

non ci sono e⁻ liberi e devono essere rispettati gli angoli di legame. Tuttavia avviene una condivisione di e⁻ di valenza.

A causa degli angoli da rispettare, è un legame direzionale \rightarrow fragilità

È un legame molto forte energeticamente, e perciò la T di fusione è maggiore rispetto ai metalli.

Il materiale perciò sarà caratterizzato da:

alta $\left\{ \begin{array}{l} \text{Rigidità} \\ \text{Resistenza a rottura} \\ T \text{ di fusione} \end{array} \right.$ bassissima dilatazione termica

peggiore conduttore $\left\{ \begin{array}{l} \text{termico} \\ \text{elettrico} \end{array} \right.$

- La resistenza meccanica che i materiali oppongono se sollecitati, ^④ dipende dall'energia di legame, cioè quella che tiene uniti gli atomi
- La capacità di reagire a tali forze esterne deformandosi elasticamente dipende molto dal tipo di legame, quindi da tipo di legame + en. di legame
- Come si "misura" dunque la rigidità del materiale?

Introduciamo il modulo elastico o modulo di Young E

In caso di trazione o compressione, gli atomi si allontanano o avvicinano rispetto la posizione di riposo (distanza di legame), e si sposta anche il ΔE associato al tipo di sollecitazione, ad es. per la compressione ΔE a sx della posizione di en. minima, inverso per trazione.

Anullate le sollecitazioni, gli atomi tornano in posizione di en. minima.

Couder-Horse quindi ci giustifica solo la def. elastica, che è propria di tutti i materiali!

- Si definisce un'azione esterna dovuta ad una forza uniaxiale F a trazione
- Ogni superficie $\perp F$, sopporta F : esiste una superficie portante A .
- Si definisce allungamento $\Delta L = L - L_0$ quello lungo la direzione di trazione. È molto importante in questi casi la forma del provino.
- Definiamo sforzo nominale σ (stress):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \langle \sigma \rangle = \frac{N}{m^2} \quad \text{! nota: } \sigma = F_L \cdot A$$

- Definiamo deformazione ϵ (strain):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \langle \epsilon \rangle = \text{adimensionale} \quad [\text{deformazione lineare}]$$

- Legge di Hooke (solo per deformazioni elastiche):

$$\sigma = E \epsilon \quad \langle E \rangle = \frac{N}{m^2} = Pa \quad (\text{di solito si usano GPa})$$

"Ogni solido si deforma, e la deformazione si annulla se si rimuove la sollecitazione".

A livello microscopico la legge si scrive come:

5

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

s = rigidezza legame

a_0 = distanza di legame

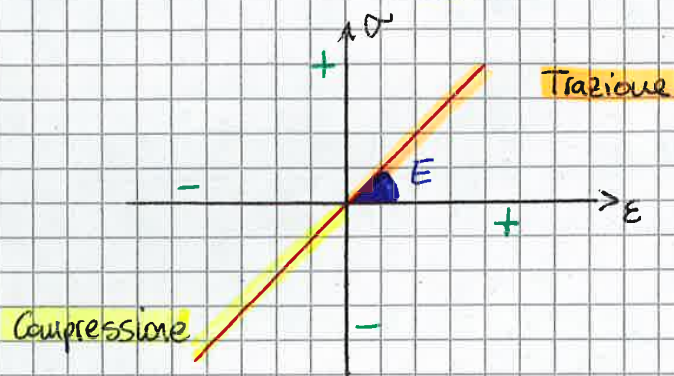
• Esaminiamo ora trazione e compressione uniaxiale:

- trazione uniaxiale

soll $\sigma = F/A$ def $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, $\Delta L = L - L_0 (> 0)$

- compressione uniaxiale

soll $\sigma = -F/A$ def $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, $\Delta L = L - L_0 (< 0)$



Quando si ha una composizione di forza F , la si scinde nelle elementari e si calcolano le singole componenti.

• Varie tipologie di sollecitazioni

① Trazione uniaxiale

④ Pressione interna P

⑦ Flessione (genera 1+2)

② Compressione uniaxiale

⑤ Pressione idrostatica

③ Trazione biassiale

⑥ Taglio $\tau (F_{||}/A)$

Si nota dalle 6 che:

$\sigma = F_{\perp}/A$ $\tau = F_{||}/A$ \rightarrow sfruttano 2 aree diverse di applicazione

- Si definisce ⑥
 - materiale isotropo quello in cui il valore della proprietà è indipendente dalla direzione lungo la quale si misura.
 - materiale anisotropo quello in cui il valore della proprietà è dipendente dalla direzione lungo la quale si misura.

In particolare nell'isotropo lungo le direzioni trasversali, x e y , la deformazione è identica: $\epsilon_x = \epsilon_y$

La def \perp è < 0 se def \parallel è > 0 → trazione uniaassiale, $\nu > 0$

La def \perp è > 0 se def \parallel è < 0 → compressione uniaassiale, $\nu < 0$

Per capire ricorda che in un reticolo cristallino cioè che influenza un atomo, influenza ogni atomo circostante.

- Relazioni tra le costanti elastiche

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

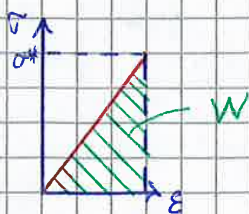
- L'energia elastica

Con la def. elastica il materiale accumula energia, che rilascia con il cessare della sollecitazione.

Si definisce il lavoro per unità di volume: $dW = \frac{F \cdot dL}{AL} = \sigma d\epsilon$

integrando: $W = \int_0^{\sigma^*} \sigma d\epsilon = \int_0^{\sigma^*} (\sigma/E) \rightarrow$

$$\rightarrow W = \frac{(\sigma^*)^2}{2E}$$



- Misura di E

dinamiche → onde sonore → misure attendibili

↳ v di propagazione nel materiale dipende da $\sqrt{E/\rho}$

• **Le strutture dei metalli** (7)

Possiamo identificare 3 strutture: FCC, CCC, EC. Esaminiamoli:

① CCC → 8 atomi (vertici) + 1 atomo centrale → A-B → 68% FIA

② FCC → 8 atomi (vertici) + 6 atomi (facce) → A-B-C → 74% FIA

③ EC → 12 atomi (vertici) + 2 atomi al centro delle basi +
+ 3 atomi interni → A-B → 74% FIA

NOTA: FIA = fattore di impaccamento atomico.

Nell'esempio di EC, con ripetizione A-B, la base inferiore di un esagono, sarà la base superiore di quello sotto, e viceversa.

- I voti sono buchi interstizi e sono molto importanti, perché in tali spazi possono andare ad inserirsi materiali che vanno a modificare la composizione e le proprietà del "materiale originale".

• **Allotropia/Poliomorfismo** significa avere nel reticolo cristallino del materiale una ≠ struttura a seconda delle T a cui si trova lo stesso.

Distinguiamo

passaggio di stato → es. liquido/solido, ...

passaggio di fase → passare da una struttura reticolare ad un'altra con = stato compositivo (liquido, solido, gas)

Per calcolare il volume occupato, e quindi il volume interstiziale, si introduce del liquido o gas nel materiale e si calcola per sottrazione il volume occupato.

• **Densità ρ**

Dipende da peso atomico (PA) e dal FIA

- metalli → PA e FIA elevati dovuti a non aver vincoli geometrici ^{precisi} da rispettare.
 (Me)
 Ciò porta ad avere alte ρ .

- ceramici → PA e FIA bassi, dovuti ai vincoli geometrici (angoli di legame) (rapporti stechiometrici)
 \downarrow
 FIA meno efficace.
 Ciò porta ad avere basse ρ rispetto Me.

- Compositi → combinazione di 2 ≠ materiali per ottimizzare le proprietà di entrambi e creare un materiale con nuove proprietà. La combinazione avviene però così che a livello microstrutturale non siamo in grado di riconoscere le ≠ fasi.

In fatti matrice e rinforzo sono distinguibili a livello di μm .

Tuttavia comunque esistono materiali delle specie compositi che derivano dalla combinazione di materiali =

Il rinforzo di compositi può anche avvenire tramite fibre corte o particelle disperse, fibre lunghe unidirezionali con rinforzo trasversale.

• Regola della miscela

- Frazione in volume della matrice $f_m = \frac{V_m}{V_m + V_f}$ → $f_m + f_f = 1$

- Frazione in volume delle fibre $f_f = \frac{V_f}{V_m + V_f}$

con:

V_m = volume occupato dalla sola matrice

V_f = dalle sole fibre

- Per il composito è meglio ragionare in termini volumici per la determinazione delle proprietà

- Proprietà Composito $P_c = f_f P_f + f_m P_m = f_f P_f + (1 - f_f) P_m$

- Densità Composito $\rho_c = f_f \rho_f + f_m \rho_m = f_f \rho_f + (1 - f_f) \rho_m$

con:

f_f = frazione in volume delle fibre

f_m = frazione in volume matrice

P_f = proprietà fibra

P_m = proprietà matrice

ρ_f = densità fibra

ρ_m = densità composito

I compositi a fibre lunghe allineate sono materiali anisotropi, cioè nei quali le proprietà variano in base alle direzioni. Perciò questi sono realizzati come sovrapposizione di lamine di composito con trame volte al rafforzamento.

(9)

• **Proprietà specifiche**

Si definisce proprietà specifica = $\frac{\text{Valore assoluto delle proprietà}}{\text{Densità}}$

A seconda di ciò che vogliamo dal materiale, alcune decisioni su alcune proprietà potrebbero portare questo dall'essere il prescelto all'essere scartato. (es. se ci interessa rigidità o resistenza, ---)

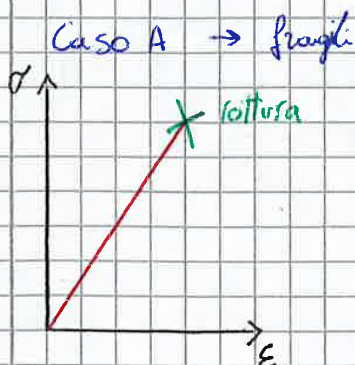
Le mappe di Ashby aiutano a restringere il campo di ricerca in base a ciò che vogliamo.

Oltre l'elasticità: la duttilità

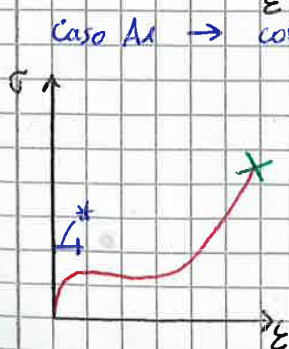
• Come si comportano i materiali oltre i naturali limiti di elasticità?

(A) materiale fragile → si rompe e ha comportamento elastico fino a rottura

(B) materiale duttile → oltre alla deformazione elastica, vi è anche una deformazione plastica, irreversibilità prima della rottura.



Curva di comportamento sotto stress fino a rottura di Ceramiche e TI



Curva di comportamento sotto stress fino a rottura degli elastomeri

* lineare solo in un primo tratto con σ molto piccolo

11) soluzioni solide sostituzionali

10

Un atomo diverso dagli atomi del solvente va ad occupare una posizione reticolare [negli interstiziali gli atomi andavano ad occupare i vuoti, mentre ora vanno proprio nelle posizioni occupate dagli atomi del reticolo], a patto però che vengano rispettate alcune condizioni.

Siano $\begin{cases} r = \text{raggio atomo sostituito} \\ R = \text{raggio atomo solvente} \end{cases}$

- $r \approx R \rightarrow$ modifiche distanze/variazioni reticolari molto piccole
- $r > R$ (poco) \rightarrow atomi circostanti si spostano leggermente e si crea uno stato di deformazione locale attorno al difetto seguito da compressione dei legami degli atomi delle catene adiacenti.
- $r < R \rightarrow$ legami in compressione seguito da trazione dei legami degli atomi delle catene adiacenti.

Nel caso di solido ionico (es. NaCl) bisogna tenere conto nelle fase di sostituzione in quale tipologia di vacanza questa avviene, cioè se sostituisco uno ione positivo o negativo. Si ricorda che deve essere rispettata la neutralità della molecola, perciò quali sono le tipologie di difetti in un solido ionico?

A) Difetti di Frenkel \rightarrow uno ione si sposta da una posizione regolare ad una interstiziale creando l'autointerstiziale.

Quindi si ha una coppia di difetti: vacanza + autointerstiziale (essendo anioni più grandi e cationi più piccoli) Vi è una maggiore probabilità che si verifichi tale difetto per cationi più che per anioni.

B) Difetti di Schottky \rightarrow la mancanza di un catione viene compensata da una vacanza anionica, così da mantenere la neutralità.

→ anche detta carburazione. Essendo questi composti da C + Fe, (11) per inserire gli atomi di C in combinazione con quelli di ferro si sfruttano gas ricchi del primo (es. metano) per andare a riempire le soluzioni interstiziali.

La diffusività cambia valore a seconda della tipologia di Fe in uso e quindi in base al reticolo. (ccc ha riempimento ≠ CFC !!!)
 $C \text{ in Fe cfc ha } D < C \text{ in Fe ccc}$

- La solubilità non va confusa con la diffusività. Infatti la solubilità indica la quantità di atomi di C che possono essere inseriti in un reticolo.

Analisi solubilità CCC vs CFC
 6.8% 4.4%

In una CCC ho più spazio in cui l'atomo di C può inserirsi rispetto alla CFC. Però proprio a causa di ciò, quando un atomo di C (che ha comunque un raggio > di quello massimo disponibile sia per CCC che per CFC) entra in un CCC, va a stringere di molto i restanti interstizi, e in questo modo viene limitato l'inserimento di nuovi atomi di C. Invece essendo il CFC più compatto, non potrà verificarsi questa grande differenza di raggi interstiziali, e dunque si capisce come, nonostante il CCC abbia maggiori spazi, risulti meno "solubile" del CFC.

Difetti di linea: Dislocazioni

Per dislocazione si intende lo spostamento, rispetto ad un piano di scorrimento, di atomi. Avvenendo tale spostamento, non si ha però una traslazione di entrambi gli estremi, ma solo di uno dei 2. A causa di ciò viene a formarsi un semipiano aggiuntivo. Il vettore di scorrimento o di Burgers \vec{b} indica direzione ed entità dello spostamento.

- Bordi di grano (zone di confine tra grani)

(12)

Ogni grano ha solo 1 direzionalità.

La zona di confine è un difetto superficiale.

Gli atomi del bordo di grano devono mantenere però qualche direzionalità? Di solito o una direzionalità intermedia oppure c'è una vacanza.

Difetti tridimensionali: porosità, inclusioni, precipitati

Porosità

$$P = \left(\frac{V_P}{V_{TOT}} \right)$$

V_P = vol. vuoto nel materiale.

$$E = E_0 (1 - 1,9P - 0,9P^2)$$

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-nP}$$

Precipitati

Si creano nel caso di soluzioni solide con miscibilità parziale.

Precipitati = soluto in eccesso

I bordi di grano sono i posti ideali (vacanze) per i precipitati.

Se troppo grandi (e quindi comporterebbero troppe tensioni nel reticolo)

il reticolo li confina nei bordi di grano.

Diagrammi di stato

{ Ascisse: Temperatura = T

Ci indicano, per una sostanza pura, a

{ Ordinate: Pressione = P

quali T e P si ha una determinata fase

Si hanno dunque 2 gradi di libertà.

Regola delle fasi (o di Gibbs) ci dice il # di variabili indipendenti che posso modificare per mantenere o cambiare il # di fasi presenti:

$$V = \Lambda - \phi + F$$

V = varianza = # variabili indipendenti necessarie a caratterizzare il sistema all'equilibrio

Λ = # componenti chimici nel sistema

F = fattori fisici attivi (T, P)

ϕ = # fasi presenti nel sistema in quel punto

Noi analizzeremo essenzialmente 3 casi:

(13)

- ① Totale miscibilità allo stato solido e liquido;
- ② Totale miscibilità allo stato liquido e completa immiscibilità allo stato solido;
- ③ Totale miscibilità allo stato liquido e parziale miscibilità allo stato solido.

Attueremo però una semplificazione: la P sarà quella ambiente, perciò l'eq. di Gibbs "base" diventerà:

$$V = n - \phi + 1$$

Andremo ad analizzare diagrammi a 3 componenti, due però saranno tridimensionali.

Il nuovo diagramma perciò sarà così strutturato:

asse ascisse → composizione del sistema espressa in % in massa
 asse ordinate → Temperature.

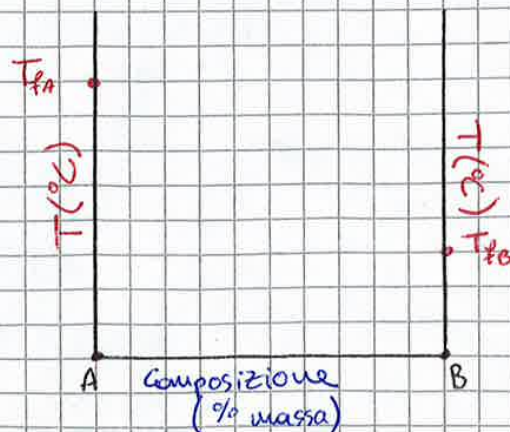
Però siamo in presenza di 2 componenti:

allora sulle ascisse l'estremo A rappresenterà 100% A, 0% B, mentre l'estremo B rappresenterà 0% A, 100% B.

Poiché ora, le temperature caratteristiche (per cristallini è $T_{fusione}$) sono diverse tra A e B, si usa questa convenzione:

l'ordinata su A indica la $T_{fusione}$ del materiale 100% A

" " B " " " " 100% B:



Occhio a dove
 metti T_{fA} e T_{fB} !!!

Come si comporta al raffreddamento?

(16)

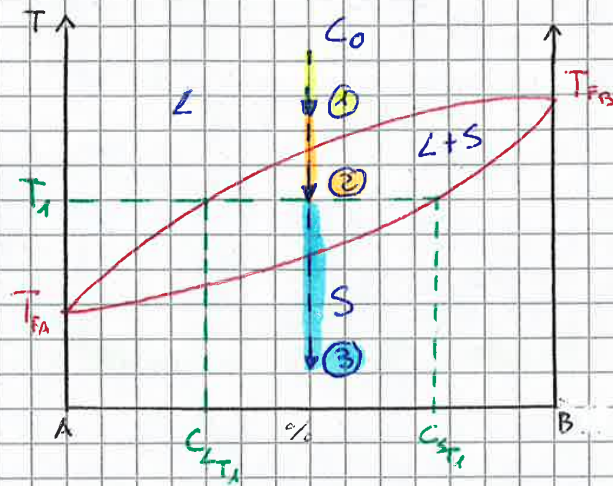
Si ha una situazione iniziale definita come " C_0 ".

Tale situazione mi definisce le % di miscela del componente.

Definita una T , è possibile definire C_{LT} e C_{ST} .

C_{LT} = Composizione del materiale quando inizia la fase di solidificazione (linea di liquidus).

C_{ST} = Composizione del materiale quando finisce la fase di solidificazione (linea di solidus).



Fasi di analisi:

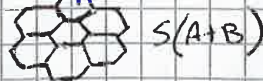
① inizio \rightarrow L
 C_0 tutto liquido



② transizione \rightarrow L+S
 C_0 liquido + solido



③ fine \rightarrow S
 C_0 tutto solido

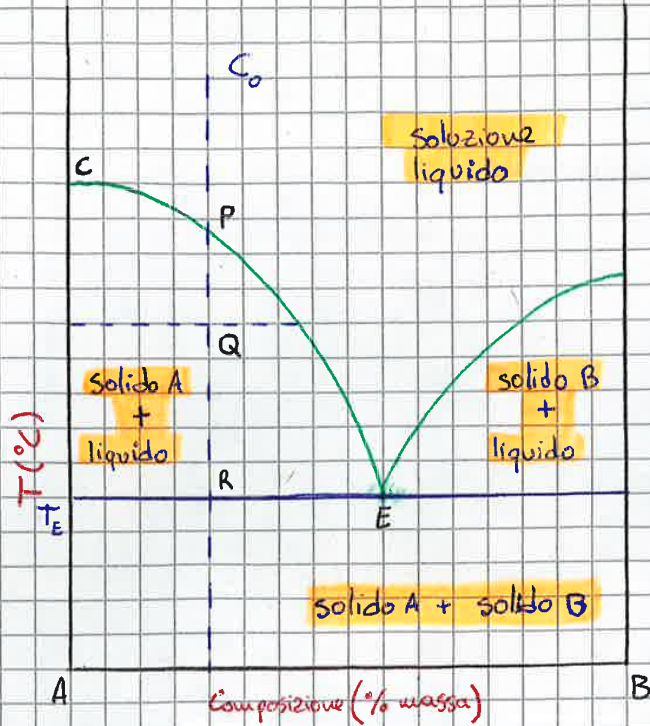


MICROSTRUTTURE

Se cambio T , cambiano le linee di riferimento.

!!!
ooo C_{LT} e C_{ST} , ci indicano le % di liquido o solido presente nelle situazioni indicate, ma non indicano che le % di materia siano cambiate (non siamo dei maghi) !!!
ooo

(15)

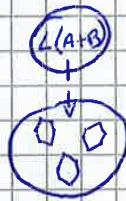


Microstruttura

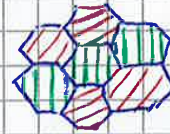
① Tutto liquido



② L+S



③ S_A+S_B



!!!
 Importante è da notare che si raggiunge la fase eutettica, ma SOLO il LIQUIDO può seguire tale trasformazione, mentre il solido che già si è creato (sotto la linea di liquidus), RIMANE TALE e NON FA TRASFORMAZIONI ULTERIORI.

Come so quanto è solido o liquido il composto in un dato punto?

C'è solidificazione di 1 elemento alla volta. se capito nella zona S_A+L, avrò 100% di solido A (perché è quello in maggior quantità) e una % di liquido che vado a calcolare, come al solito, tracciando la linea della Temperatura e vedendo dove interseca la linea di liquidus.

Viceversa per il caso in cui ci trovassimo nella zona S_B+L

il verificarsi della situazione.

(16)

Come indico questo fenomeno sul grafico?

Indico ciò con una retta verticale che parte dall'asse delle asse e arriva fino a T_a cui poi il composto si liquefa.

• Ci sono tuttavia anche composti intermedi a fusione incongruente la fusione avviene tramite una **trasformazione peritettica**: un solido si trasforma, ad una data T , non in un liquido, ma in un liquido + un solido con composizione \neq da quella iniziale

• **Trasformazione eutettoidica** \rightarrow da una fase solida, ottenendo 2 fasi solide, entrambe \neq dalle primarie. ($S_1 \rightarrow S_2 + S_3$)

Si ha formazione di struttura eutettica a lamelle alternate S_2 ed S_3 .

Prove meccaniche

Le prove possono essere suddivise in 3 gruppi:

- prove meccaniche statiche \rightarrow si applica la sollecitazione e si guarda la risposta del materiale man mano che la sollecitazione cresce.

Nella maggior parte di queste prove si arriva a rottura, al fine di esprimere le caratteristiche del materiale.

- prove dinamiche \rightarrow sollecitazione applicata sotto forme di impulso di energia (quindi in condizioni molto particolari):

- prove di fatica \rightarrow si applica la sollecitazione in maniera ciclica, per vedere quanto il materiale è in grado di durare nel tempo.

Ogni prova deve sottostare a delle regole e norme (EN UNI, ISO, ASTM, ...)

Analizziamo nello specifico le **PROVE STATICHE**

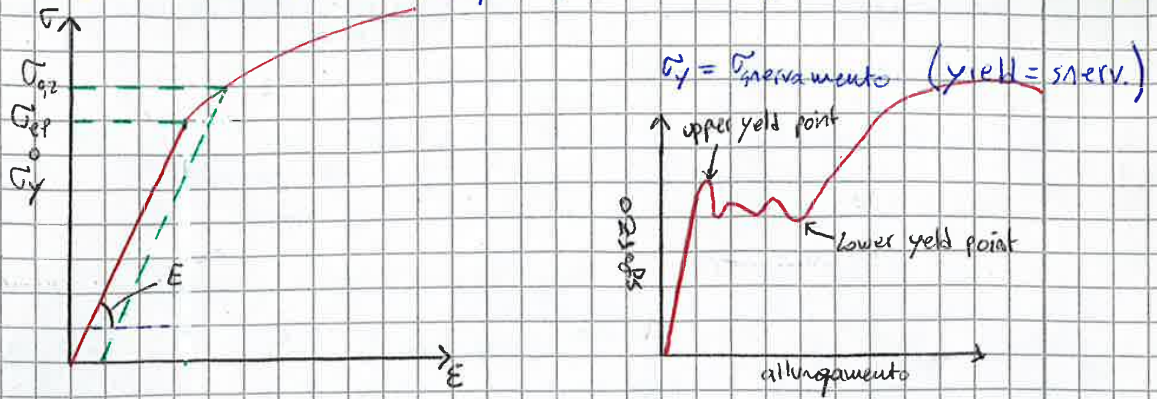
Esistono 4 tipi di prove statiche:

- a trazione
 - a compressione
 - a flessione
 - di durezza
- Solo le prove di durezza non prevedono l'aumento del carico fino a rottura.

Ora vediamo l'analisi delle singole parti del grafico

(14)

(1)

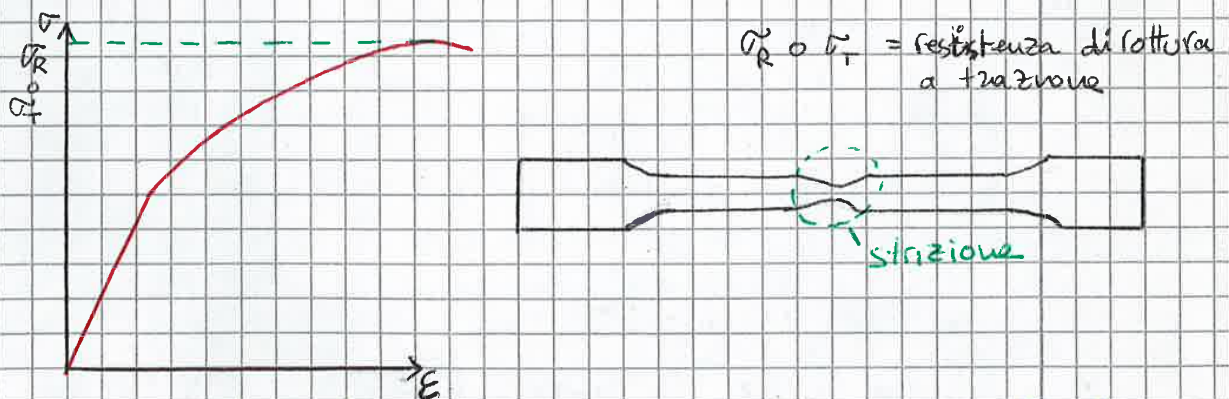


$\sigma_{0,2}$ = sforzo necessario per indurre un allungamento dello 0,2%

Si usa quando si ha difficoltà nella determinazione della σ_y nel metallo, a causa di fluttuazioni (vedi grafico a destra).

il $\sigma_{0,2}$ viene anche detto σ snervamento convenzionale.

Fino al raggiungimento della σ_y o $\sigma_{0,2}$, il comportamento del materiale risulta in campo elastico. Superato questo limite entriamo nella zona plastica o meglio elasto-plastica.



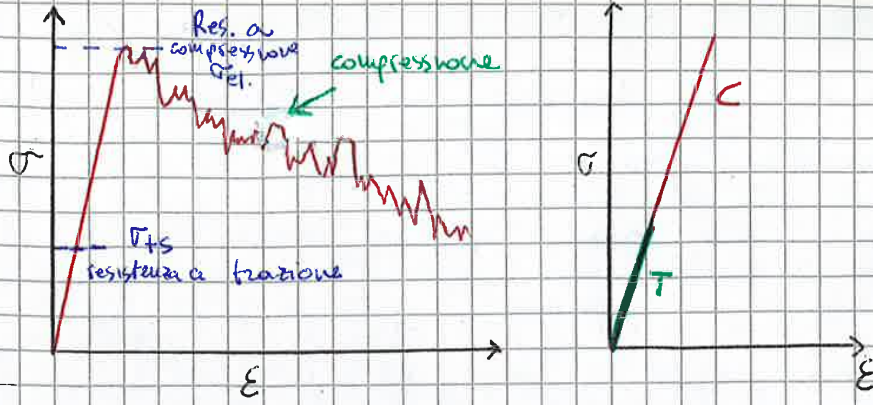
σ_R o σ_T = resistenza di rottura a trazione

La curva continua fino ad un punto particolare, dove si ha la resistenza di rottura a trazione.

Questo punto viene preso poiché incomincia a verificarsi nel provino una strizione (deformazione disomogeneamente distribuita).

Il fenomeno della strizione prevede un assottigliamento nella zona utile del provino, ma in una regione centrale limitata. A causa di ciò, la σ_R rappresenta il limite prima che il grafico subisca una "discesa" dovuta solo al fatto che il meccanismo registra le nuove deformazioni che sono solo frutto dei comportamenti dovuti alla strizione stessa.

Ceramica



(18)

Le 2 curve hanno
 = E, perché hanno
 = pendenza.
 E dipende dal tipo
 di legame. Essendo
 il materiale lo stesso,
 E non cambia!

In fase di compressione, tutte quelle "scacchiate" sono dovute al fatto che il materiale non è più integro, ma continua ad esercitare una certa resistenza. In fase di post prova bisogna "ripulire" il grafico dalle incongruenze.

• Prove di Durezza (Hardness) - H

L'unica prova che non prevede la rottura del provino \rightarrow non distruttiva. Si usa un penetratore, e si misura la resistenza a penetrazione rispetto all'area resistente.

In questo caso quindi il grafico sarà carico - area (solcata dallo strumento).

- Esistono diverse prove di durezza:

- HB - Durezza Brinell \rightarrow punta sferica di acciaio o carburo di tungsteno (WC)
- HR - Durezza Rockwell \rightarrow sfere di acciaio o coni di diamante
- HV - Durezza Vickers \rightarrow piramidi a base quadrata in diamante (micro vickers \rightarrow carichi applicati minori)
- HK - Durezza Knoop \rightarrow piramidi a base romboidale in diamante (micro Knoop \rightarrow carichi applicati minori)

Il materiale del penetratore deve essere sempre più duro del materiale su cui si effettua la prova.

La forma del penetratore sono importanti per definire quella che è l'area di penetrazione.

Si ha ora la determinazione delle caratteristiche ponendo una massa sul penetratore, che indurisce la punta sul materiale.

Il ruolo dei difetti sulla duttilità dei metalli

(19)

Vacanze, atomi sostituzionali, interstiziali, altre dislocazioni, bordi di grano agiscono come ostacoli al moto dislocativo: in tal modo diminuisce la duttilità e cresce la resistenza.

Nella realtà può esserci la presenza di più di uno di questi difetti: in tutti gli acciai sono presenti interstiziali (messi da noi) e si creano dislocazioni.

Se l'interstiziale può muoversi, andrà nel vertice (vicino) della dislocazione, perché complessivamente si ha una maggior stabilità (o meglio: ha una riduzione di instabilità).

Lo sforzo di taglio applicato per far muovere le dislocazioni viene in parte contrastato da una "forza di attrito reticolare".

Il movimento della dislocazione avviene solo se: $\tau > f/b$
 con f = forza di attrito e b = vettore spostamento

• Tensione lineare T

Per mantenere l'energia potenziale + bassa possibile (del cristallo), la dislocazione cerca di mantenersi la più corta possibile, come se fosse associata ad una tensione lineare.

Tale tensione è un'energia per unità di lunghezza (unitaria) ed è definita come:

$$T = \frac{1}{2} E b^2$$

Il reticolo si oppone al moto dislocativo, il quale causa la duttilità, che trovano solo nei metalli.

Nei ceramici ci sono le dislocazioni, ma non si muovono!!!

• Meccanismi di rafforzamento

- ① - rafforzamento da soluzione solida → aggiungo elementi in lega (interstiziali)
- ② - rafforzamento per precipitazione o dispersione → aggiungo precipitati o particelle disperse per aumentare il fattore di attrito.

• Riprendendo i 4 tipi di rafforzamento:

(20)

1) sol. Solida (ss)

il contributo della soluzione solida a σ per moto dislocativo ϵ :

$$\sigma_{ss} = \alpha EC^{1/2}$$

C = concentrazione del soluto

↑
pena agli
acciai e ghise
% C in Fe

+C → ghise → + resistenza
-C → acciai → + duttili

sostituzione → li inseriamo in posizioni occupate da altri atomi

interstiziale → " " " vuote

il diametro è importante: + piccolo → trazione
+ grande → compressione

Gli effetti del rafforzamento sono visibili sulla σ di rottura e di snervamento.

A parità di concentrazione, con diametro minore ho maggior resistenza

Sul grafico σ - ϵ , il tratto elastico non varia, essendo il moto dislocativo

tipico del tratto plastico. In generale il grafico dell'elemento rafforzato

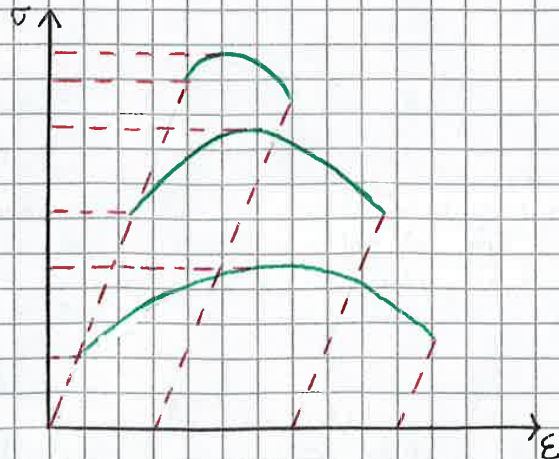
trasla verso l'alto, però a causa delle conseguenti diminuzione dei

moti dislocativi, si ha una riduzione dell'allungamento complessivo,

che è indice di minor duttilità (ricorda: duttilità data da movimenti dislocativi). Il modulo elastico E = perché dipende dal tipo di legame (che E =).

Quindi il rafforzamento per soluzione solida provoca un innalzamento

della σ a rottura e di snervamento, una (limita) riduce la duttilità.



E rimane costante.

Se le particelle che la dislocazione deve attraversare sono troppo resistenti, questa è costretta a curvare, creando un raggio sempre più stretto. Tale raggio raggiunge il valore minimo quando = a metà della distanza tra le particelle L . (2.1)

La configurazione critica è quella semicircolare

Il lavoro da fare per muoversi è: τbL , che viene controbilanciato dalla tensione lineare che agisce da 2 parti: 2τ .

La dislocazione riesce a passare tra le particelle quando:

$$\tau_{PPE} = \frac{2\tau}{bL} \approx \frac{Eb}{L}$$

Però gli ostacoli esercitano una resistenza

$$\tau_{PPF} = \frac{2\tau}{L}$$

Questo metodo di rafforzamento è molto efficace: le leghe di Al rafforzate in questa maniera possono essere fino a 15 volte + resistenti dell'Al puro.

4 Rafforzamento dei bordi di grano (taglia di grano = dimensione del grano)

Una dislocazione in un grano non può semplicemente scivolare nel successivo, in quanto i piani di scorrimento non sono allineati.

Si ha un **IMPIANTO** di dislocazione, impedendo la deformazione plastica. Quindi si ha una ulteriore resistenza τ_{gb} :

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

K_p = costante di Petch

D = dimensione del grano

se $1 \leq D < 100 \mu m$, τ_{gb} è piccolo e la resistenza non è rilevante

se $D < 1 \mu m$ (materiali microcristallini o nanocristallini) la resistenza diventa significativa.

- La relazione qui sopra si chiude con la relazione di Hall - Petch

$$\sigma_y = \sigma_{monocristallo} + K D^{-1/2}$$

Più il materiale ha strutture piccole, più risulta rinforzato ($+\sigma_R$, $+\sigma_y$, -duttibilità)

Tali dislocazioni che vengono a crearsi vanno ad ostacolare 22
il moto delle dislocazioni principali.

Oltre a ciò, vengono a crearsi molti nuovi piani di scorrimento.

Una dislocazione in movimento avanza e fa scorrere il materiale al di sopra del piano di scorrimento rispetto al sottostante. Ciò crea un piccolo scalo.

Si esercita quindi una forza di bloccaggio τ_{wh} :

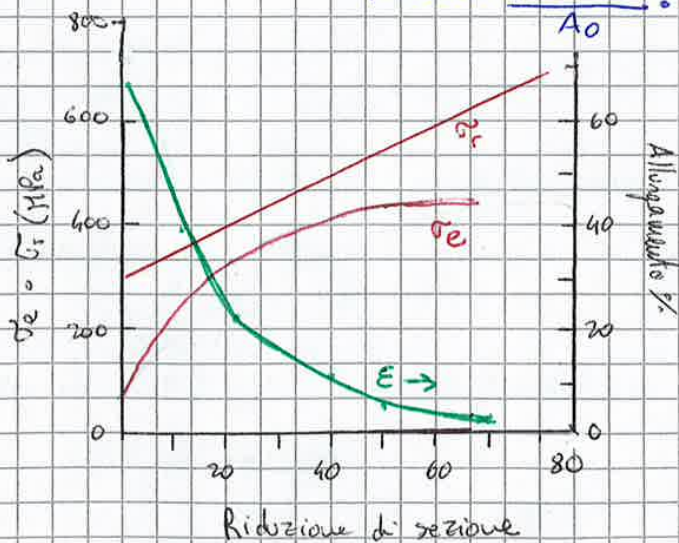
$$\Delta\sigma = \frac{F}{bL}, \quad L = \rho_d^{-1/2} \quad \text{con } \rho_d = \text{densità di dislocazioni create}$$

$$\tau_{wh} = \frac{Eb \sqrt{\rho_d}}{z} \rightarrow \text{maggiore la densità, minore la distanza che le separa, maggiore la } \tau_{wh}$$

Come al solito: aumento di σ_e , σ_r e minore duttilità

Si definisce % di lavorazione il rapporto fra:

$$\% CW = \frac{[A_0 - A_s]}{A_0} \cdot 100$$



Si definisce proporzionalmente il # di dislocazioni aggiunte e all'orientamento dei cristalli

All'aumento delle lavorazioni \rightarrow aumenta σ_y , σ_r , riduco E di rottura = - duttilità.

Tutti i metalli invecchiano se lavorati a freddo:

$$\sigma_y = (A \cdot \epsilon^n) \quad \text{con } n = \text{coeff. invecchiamento}$$

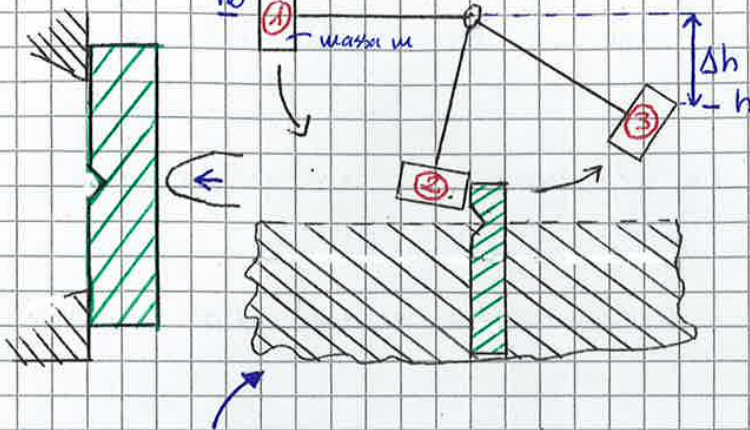
Alla fine dell'invecchiamento ho un materiale che non si riesce più a modificare in allungamento a causa delle resistenze e che quindi è sostanzialmente fragile

2) La prova di resilienza (resistenza all'impatto) mira alla verifica delle capacità del materiale di resistere a sollecitazioni impulsive (carichi improvvisi, urti).

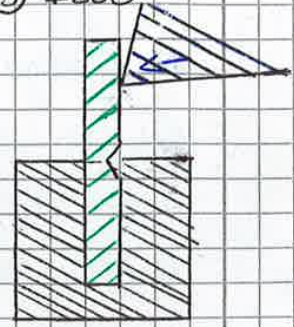
(2.3)

Di per sé la resilienza è l'energia per unità di superficie assorbita da un materiale portato a rottura.

① Charpy



③ Izod



Nel caso ①, il provino (verde) subisce un urto da una massa posta ad altezza h_0 (che ha una certa E_{pot}). Dopo l'urto, parte dell'energia posseduta dalla massa si disperde per fare rompere il provino.

Dunque la massa raggiunge una nuova altezza $h < h_0$.

Essendo nota l' E_{pot} iniziale, calcola E_{pot} finale e il ΔE è l'energia dispersa nell'urto.

Nel caso ① ho il pendolo di Charpy, nel quale un martello colpisce il provino e solo se lo spacca allora continua nel suo moto.

Nel caso ③ ho il metodo di Izod.

Alla fine di questi test, è bene analizzare le superfici ottenute:

assorbe poca en. no def. plastica

- materiale fragile → superfici di separazione molto nette (piatta).

assorbe + energia si def. plastica

- ≫ duttile → la superficie ha una struttura + frastagliata, con un continuo susseguirsi di creste e valli (granulose) → cavità → def. plastica → rottura locale.

1) tornando alla prova di "trazione" il comportamento dei materiali

vede, per un elemento tenace, un allungamento delle cricche dovuto a deformazione plastica.

La cricca interna è caratterizzata da ρ , r , a che sono 24
 all'interno del materiale e che riducono la sezione utile (quella che si fa carico della sezione applicata).

In generale però l'effetto delle cricche è quello di ridurre la capacità di assorbire sforzi (minor resistenza) rispetto al caso ideale (no cricca).

• Per quantificare gli effetti microscopici, si fa riferimento a nuove formule:

σ_{nom} = σ nominale applicata all'intero componente, privo di cricche.

$\sigma_{max\ loc}$ = σ massima locale, tenuto conto delle cricche attraverso α .

$\alpha = \sim 2$ (trazione); $\sim 0,5$ (flessione)

$$\sigma_{max\ loc} = \sigma_{nom} \left[1 + \alpha \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \right]$$

K_{sc} = fattore di concentrazione delle sollecitazioni

$$K_{sc} = \frac{\sigma_{max\ loc}}{\sigma_{nom}} = 1 + \alpha \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$

La distribuzione della sollecitazione sarà molto + concentrata in prossimità della cricca.

• Esempio numerico

al vertice
 $\sigma_{max\ loc}$ di un difetto interno di $\rho = 2,5 \cdot 10^{-4}$ mm e $2c = 2,5 \cdot 10^{-2}$ mm, con una trazione applicata $\sigma_{nom} = 170$ MPa.

$$\sigma_{max\ loc} = \sigma_{nom} \left[1 + 2 \left(\frac{c}{\rho} \right)^{1/2} \right] = 170 \left[1 + 2 \left(\frac{1,25 \cdot 10^{-2}}{2,5 \cdot 10^{-4}} \right)^{1/2} \right] = 2574 \text{ MPa}$$

Ciò significa che all'interno delle cricche c'è una porzione soggetta a $\sigma_{max\ loc}$!

• Una cricca ha 3 modi di propagazione a seconda di come avanza nel materiale:

- Modo I (di distacco) \rightarrow apertura lungo z \rightarrow materiale si apre \perp direzione cricca.

Si verifica per il materiale sollecitato a trazione semplice.

Γ è \perp direzione di propagazione della cricca.

- Si può giungere alla tolleranza del difetto, sapendo che questo è presente, progettando sapendo che i carichi a cui sarà soggetto il pezzo, staranno sotto lo σ^* . Ciò porta alla non espansione di una eventuale cricca già presente, ed è fondamentale come ipotesi per la realizzazione su scale industriali di alcuni processi.

Teoria di Griffith → materiali fragili

La frattura genera 2 nuove superfici

Si definisce tensione superficiale f il lavoro che devo spendere per aumentare di 1 unità l'estensione delle superficie.

La tenacità per materiali fragili G vale:

$$G = 2\gamma$$

In fatti il materiale fragile non fa altro che generare la nuova superficie dopo aver subito deformazione elastica.

In fatti per questi materiali, fare crescere una cricca costa l'energia necessaria a creare le 2 nuove superfici di frattura.

Il lavoro per unità di volume W è:

$$W = \frac{(\sigma^*)^2}{2E}$$

- Considerando un componente con fessura appuntita lunga c .

La presenza delle cricche induce un rilassamento di sollecitazione in una zona semi-cilindrica di raggio c , che porta alla liberazione di energia elastica ivi contenuta:

$$W_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \frac{1}{2} \pi c^2$$

Poiché fare crescere la fessura richiede energia (G_c), allora considerando la propagazione delle cricche di Δc , tale energia deve essere compensata dal lavoro necessario a creare nuove superfici $G_c \Delta c$.

Carichi ciclici: la fatica nei materiali

(26)

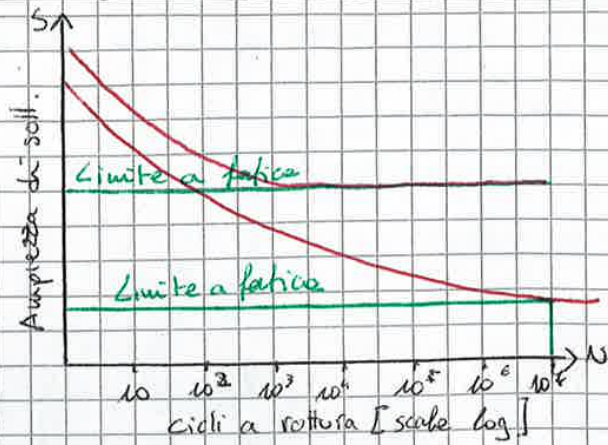
- sollecitazioni cicliche portano ad una riduzione progressiva delle prestazioni del materiale fino a rottura.
- Quando i materiali operano sotto carichi ciclici, dell'energia viene dissipata e questo porta a danneggiamento ed in seguito rottura (infatti nessun materiale è così perfetto da restituire TUTTA l'energia elastica immagazzinata, quando il carico è rimosso).
- Tale dissipazione è definita smorzamento.
Il coeff. di smorzamento η misura la dissipazione di energia (energia elastica immagazzinata e non restituita dopo rimozione carico).
Questo accumulo, \forall ciclo, porta alla comparsa di una fessura, fino alla propagazione.
- Come rimedio?
O riduco i fattori che portano a tali condizioni, o riduco il tempo di esercizio.
- Nei metalli è molto efficace la perdita dovuta a moto dislocativo su piccole scale.
Se si vogliono smorzare delle vibrazioni, occorre selezionare materiali ad alto η .
- Per i ceramici ci sono bassi η , perché le dislocazioni sono immobili, non producendo quindi molto immagazzinamento.
- Nei polimeri il moto relativo di spezzoni di catene gli uni rispetto agli altri dissipa energia sotto carico.
Il comportamento è funzione delle T operative:
 - Se $T < T_g$ (T transizione vetrosa) \rightarrow in polimeri TP si creano legami secondari; E + elevato $\rightarrow \eta$ contenuto
 - Se $T > T_g$ \rightarrow no legami secondari, catene + mobili; E + basso $\rightarrow \eta$ elevato

$$S_1 \rightarrow N_1$$

$$\vdots$$

$$S_n \rightarrow N_n$$

curva S-N
 ↓
 Curva di Vöhler



(27)

- Limite di fatica (E_L): ampiezza di sollecitazione al di sotto della quale NON si manifesta MAI rottura, o avviene per alti cicli ($N > 10^7$)

Tale limite viene anche rappresentato sui grafici con un tratto piatto, non avendo limite di rottura.

- Sì, ma in specifici quanto tempo dura il mio materiale?

Uso le leggi empiriche di Coffin e Basquin.

Questa è una correlazione tra tempo di vita a fatica (N_f) ed intervallo di sollecitazione ($\Delta\sigma$)

$$\Delta\sigma N_f^b = C_1$$

$b, C_1 = \text{costanti}$
 $b = \text{coeff. Basquin}$
 $0,07 \leq b \leq 0,13$

Per le fatiche ad alti cicli → Hookes

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{C_1}{E N_f^b}$$

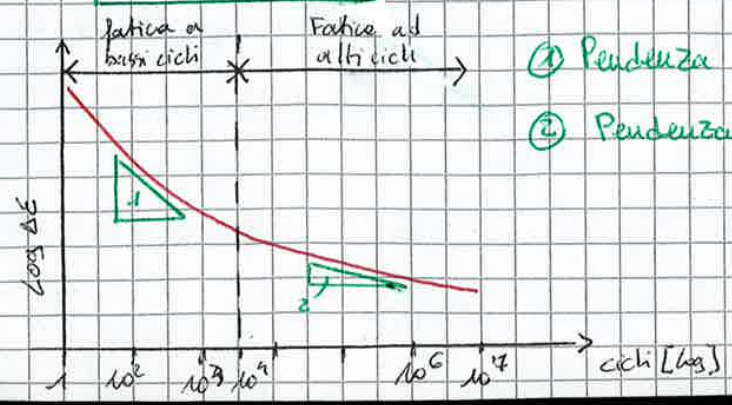
in logaritmi → $\log(\Delta\epsilon) = -b \log(N_f) + \log(C_1/E)$

questa formula si può graficare e la pendenza della curva è b (Pendenza di Basquin)

Per fatiche a bassi cicli → Coffin

$$\Delta\epsilon^{1/c} = \frac{C_2}{N_f^2}$$

$c = \text{coeff. Coffin} \approx 0,5$



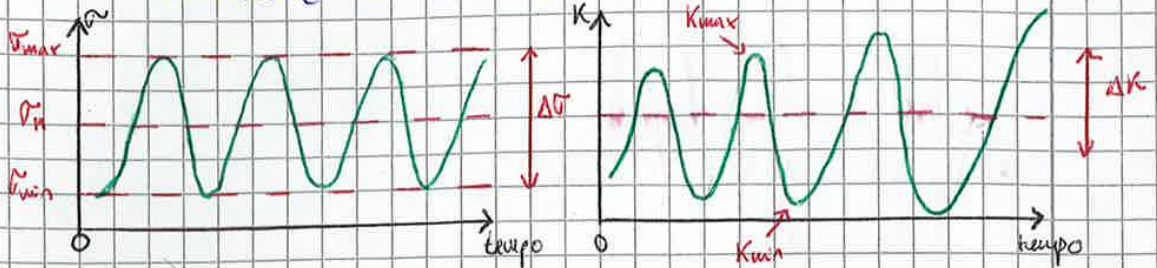
- ① Pendenza di Coffin, c
- ② Pendenza di Basquin, b

• ΔK cos'è?

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi C} \rightarrow \Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi C}$$

✓ ciclo C aumenta, e quindi aumenta ΔK .

$\sigma^* = \sigma_{critico\ locale}$ (critica perché fai aumentare la cricca)

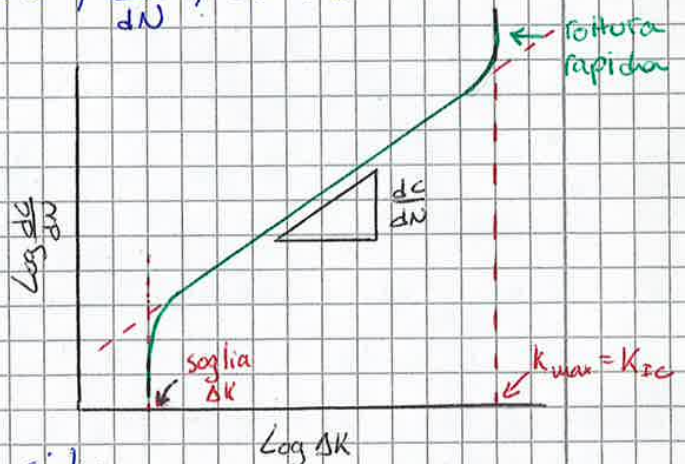


Nel tempo σ_{max} e σ_{min} continuano ad essere sempre quelle.

Il ΔK invece non ha ampiezza costante e varia ad ogni ciclo di sollecitazione perché le cricche si amplificano.

• la crescita delle cricche per ciclo, $\frac{dc}{dN}$, aumenta con ΔK con l'andamento del grafico:

- Se ΔK molto piccolo, sotto un valore di soglia, $\frac{dc}{dN} \approx 0$
 Quindi sotto tale ΔK la cricca non ha possibilità di aumentare



- Se $soglia_{min} < \Delta K < soglia_{max}$ allora si ha

una relazione lineare detta Legge di Paris tra ΔK e $\frac{dc}{dN}$:

$$\frac{dc}{dN} = A \Delta K^m \quad (A, m = \text{costanti})$$

- Se $\Delta K \rightarrow soglia_{max} = K_{IC}$ la velocità di propagazione delle cricche assume, in log, crescita esponenziale e tenderà a rottura quando giungerà a K_{IC} .

• Come aumentare la resistenza a fatica?

cricca \rightarrow in trazione aumenta

Si inseriscono stati superficiali di compressione per limitare la trazione.

Si usa pallinatura, sabbiatura, lucidatura.

- Tenacità a frattura

(29)

$$K_{Ic} = Y \sigma_c \sqrt{\pi a} \rightarrow \text{valori molto bassi } (\sim < 10 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}})$$

Tutto ciò, detto a riguardo delle proprietà meccaniche, deve tener conto delle proprietà geometriche del provino e anche del fatto che π è grande il provino, più è grande la possibilità di trovare difetti, e quindi minore la resistenza meccanica a trazione/flessione.

• **Ceramiche ingegneristiche**

Avevo ruolo di applicazione particolare, sono richieste proprietà superiori e maggiore affidabilità. Sono stati studiati per ogni genere di ambito.

• **Produzione dei ceramici.**

- Impossibilità di partire da stati fusi causa le T_f medio-alte.

- Non avendo possibilità di deformarsi plasticamente, tutti i processi che le prevedono non sono realizzabili.

Come si fa?

① Si parte da polveri ceramiche omogenee e di purezza costante.

② Formatura → permette di ottenere il crudo (particelle compattate)

③ Sinterizzazione → trattamento termico di cottura

Vediamo in dettaglio:

② Impasto formato da polveri + H_2O + componenti

Per dare forma alla polvere si possono avere 3 processi principali, la cui scelta dipende dalla geometria da realizzare, dalle caratteristiche finali del materiale o componente deve avere in fase applicativa e dalla qualità del prodotto:

②.1 **Casting (colaggio)** → si usa un mezzo liquido con 30-35% in peso di H_2O con la polvere → **Slip casting** (tecnica)

②.2 **Impasto con caratteristiche plastiche** che viene poi **estruso o iniettato** in stampi per avere la forma. Il tenore di H_2O è del 15-20%

②.3 Si usa la pressione per conferire la forma alla polvere ceramica, addizionata di 5-10% di H_2O → **Pressatura** (tecnica) → Si dice **a secco** (tipo)

③ Sinterizzazione

(30)

Nel processo industriale è un forno che parte dalla T di 250°C che eliminano l'ultima H_2O residua. Dopodiché si va verso la T di sinterizzazione ($\sim 900-1000^\circ\text{C}$ ma fino a $1500-2000^\circ\text{C}$)
 Il pezzo deve mantenere la forma, ma dobbiamo aumentare le interazioni tra particelle. Si deve passare dall'unione delle particelle ad un corpo unico massivo, vista la sua maggior stabilità a livello energetico e la ridotta en. libera superficiale. Cosa se ne fa il materiale di tutta l'energia?

- ① Minimizza en. superficiale solido-gas tramite ingrossamento dei grani (quindi minor numero) \rightarrow Maturazione di Ostwald.
- ② Minimizza en. superficiale solido-gas tramite saldatura dei grani, che aumenta la coesione del materiale \rightarrow sinterizzazione

Le particelle tra loro formano una sorta di ponte. Nel crudo, dove le particelle sono solo a contatto inizia a crearsi un punto di saldatura detto "collo di sinterizzazione".

Ciò che porta a \uparrow è dovuto alla diffusione allo stato solido dovuta alle alte T .

La formazione di detti colli non porta alla variazione delle lunghezze delle particelle. Nel processo di sinterizzazione quindi a causa di ciò, le particelle si compenetrano, riducendo la distanza complessiva. Globalmente quindi si ha un "ritiro da sinterizzazione".

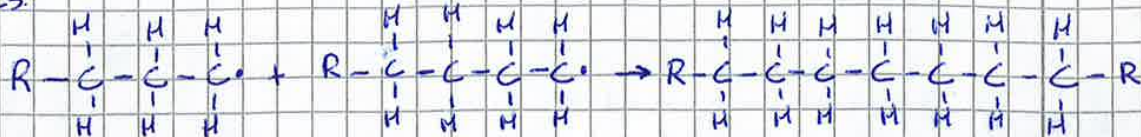
e una riduzione del volume complessivo (aumenta la densità, essendo ^{processo di densificazione} la massa costante). Al 93-94% di densità ^(teorica) (originale), il poro è circondato solo da materiale ceramico.

Si è passati da polvere a materiale policristallino!

I pori, come le cricche, sono i difetti delle teorie di Griffith.
 Anche la durezza diminuisce al crescere delle porosità.

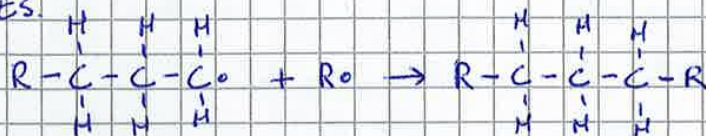
(A) Una prima soluzione è che 2 gruppi costituiti da una catena radicalica si uniscano (catena + la parte di propagazione raggiunta fino a quel momento). Essendo ognuno costituito da un radicale, la catena si divide. (31)

Es:

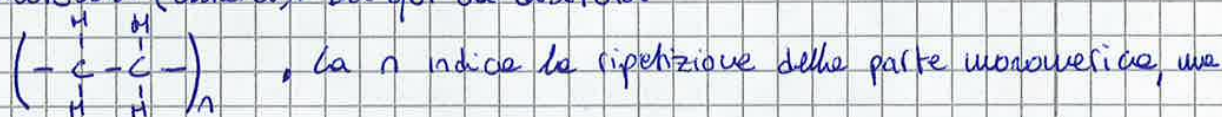


(B) Una seconda soluzione è che la catena radicalica (+ propagazione) vada ad unirsi ad un iniziatore che ancora non ha reagito con una unità monomerica.

Es.



Questo avviene perché ci si trova in una miscela! Si capisce quindi come sia impossibile determinare a priori quale sarà la lunghezza della molecola (catena). Da qui da diatura



anche che non si sa con esattezza quanto quella n sia effettivamente.

- invece nel caso di polimerizzazione per condensazione, come scritto, si parte da 2 gruppi funzionali di solito terminanti con "OH" (gruppo OH). ciò che rimane quando si legano e formano H₂O è un ossigeno con carica negativa legato ad un C, che preso un gruppo OH, avrà carica positiva (O⁻ perde ha ceduto un H⁺) (ciò continua, allungando la molecola nello stesso modo (=reazioni) la reazione avviene in successione.

I monomeri trifunzionali hanno il gruppo OH in almeno 3 posizioni, e ciò dà luogo a polimeri ramificati o reticolati

- Quando facciamo riferimento alla disposizione delle unità ripetenti, (32) possiamo avere 3 casi di distribuzione:

① Catena lineare.

Si ha una direzione preferenziale di sviluppo.



② Catena ramificata

Si ha che (ad es.) un radicale va a reagire in una posizione dove c'era un H, creando una ramificazione laterale.



③ Catena reticolata

Si sviluppa un reticolo con legami trasversali tra \neq macromolecole che crea un vero e proprio reticolo.



I legami trasversali sono equivalenti a quelli del tratto lineare. $\begin{matrix} ||| \\ \text{ooo} \end{matrix}$

• **Tipologie di polimeri**

① TP = Termoplastici \rightarrow no catene reticolate. Solo lineari o ramificati

② Elastomeri \rightarrow sono presenti legami trasversali (di lunghezza ridotta) e in $\#$ ridotto

③ TI = Termindurenti \rightarrow alto $\#$ di legami trasversali

I legami trasversali sono di tipo covalente (sono forti) $\begin{matrix} ||| \\ \text{ooo} \end{matrix}$

• Più nel dettaglio:

① Termoplastici \rightarrow sono flessibili e resistenti a T ambiente.

Rammolliscono ad alte T (+ scorrimento tra le catene $\begin{matrix} \text{una sull'altra} \\ \vee \end{matrix}$)

② Termindurenti \rightarrow Non rammolliscono. Con l'aumento della T si va verso il rammollimento del polimero stesso. Nello specifico durante la sintesi alle alte T diventano + rigidi e resistenti dei TP, però se dopo tale processo vengono ancora esposti ad alte T, si decompongono.

Essendo molto ramificati infatti, la decomposizione non può avvenire, implicando questa uno scorrimento tra le catene.

Posso rompere solo i legami trasversali? No! perché sono identici a quelli della catena lineare. Quindi non c'è priorità! Il polimero spezza indipendentemente gli uni e gli altri, portandolo a decomposizione $\begin{matrix} ||| \\ \text{ooo} \end{matrix}$

• Si definisce cristallinità il rapporto % tra peso del polimero cristallino e peso totale

La propensione a cristallizzare diminuisce

- con la presenza nella catena di sostituenti ingombranti
- " " di ramificazioni
- con la velocità di raffreddamento alta.

• Temperatura di transizione vetrosa T_g

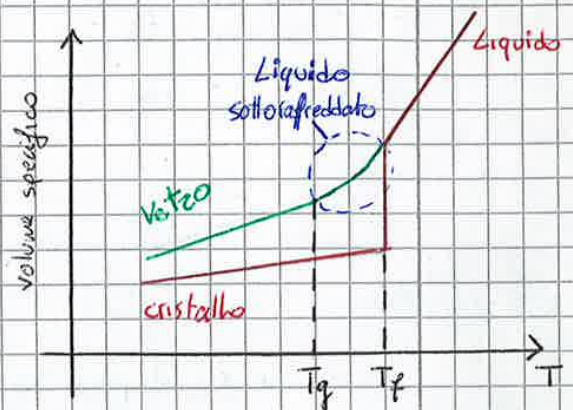
Qualsiasi materiale amorfo non ha una T di fusione o solidificazione.

Consideriamo il grafico sotto:

Per un cristallo, ad alta T ho liquido.

Raffreddandolo fino a T_f otengo

solidificazione con diminuzione del volume. Dopodiché la variazione di volume sono ridotte, riducendo T .



Per i materiali amorfi tentando di solidificare il liquido amorfo, si arriva in un punto in cui il materiale assume lo stato di liquido sottoaffreddato.

Cio' implica che in tale range di T , il materiale tende a rimanere allo stato liquido (non si sono formati tutti i legami dello stato solido), una aumenta di molto la viscosità, tanto da permettergli di mantenere una forma. Tramite sollecitazioni notevoli è possibile indurre variazioni di forma. In generale è il limite tra liquido sottoaffreddato e stato solido.

Una fase intermedia tra amorfo e cristallino è il semicristallino.

In tale caso le T caratteristiche sono la T_f (solo zone cristalline) e

T_g (solo zone amorse). Si dovrà tener conto di entrambe le componenti.

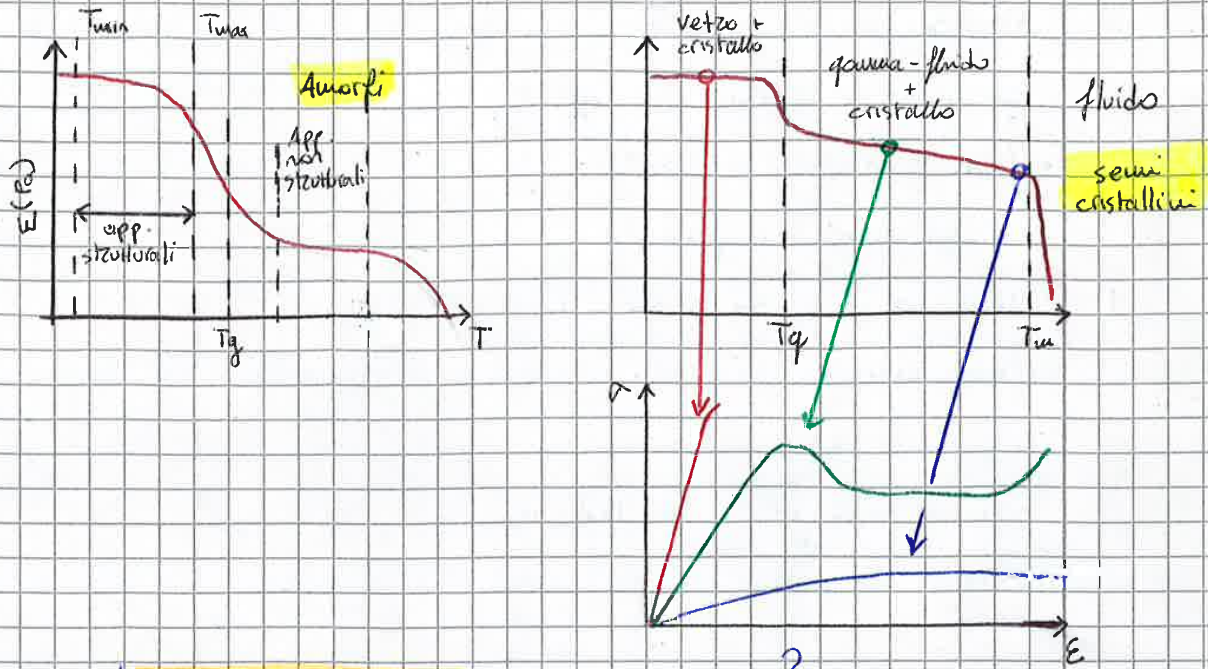
Il polimero amorfo quando $T > T_g$ ha la possibilità di far scorrere le catene tra loro e il materiale ha comportamento gommoso.

Se $T < T_g$ invece si avrà un comportamento vetroso (no movimenti catene)

Per un polimero semicristallino invece se $T < T_g$ avrà comportamento rigido e fragile. Se $T > T_g$ c'è un miscuglio di comportamenti tra

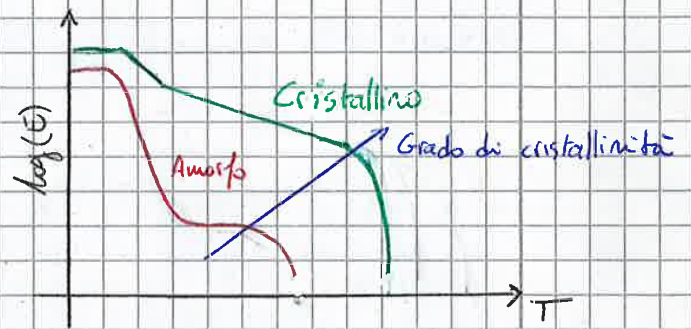
• Comparazione grafici amorfi e semi-cristallini

(34)



• Come il grado di cristallinità agisce su E e T ?

Più il materiale tende alla cristallinità, più la variazione in corrispondenza di T_g è ridotta



Nel caso di strizione, questa vede gli elementi catene in forma spaghi orientarsi nella direzione della trazione e ad allinearsi. la parte del provino si assottiglia per via dell'ordine e per lo scorrimento tra le catene. (L'ordine è allineamento e poi scorrimento)

• la deformazione plastica in TP è dovuta ad un flusso plastico (vedi grafico al fondo della 2 fasciata di p. 17)

Il materiale stirato è ~8 volte + resistente e rigido che in precedenza, ma potendo essere solo stirato in fibre e lastre, la geometria è limitata. Nell'ultima fase di stiramento però possono verificarsi fenomeni di crazing, cioè piccole fessure che si propagano nel polimero che sono anche attraversate da alcune fibre. Si rotano perché la loro presenza fa diventare bianco il materiale.

Per alcune resine si ha l'influenza (minima) della T_g che dipende dal # di legami trasversali. A certe range di T si hanno comportamenti dal fragile al duttile (limitato):

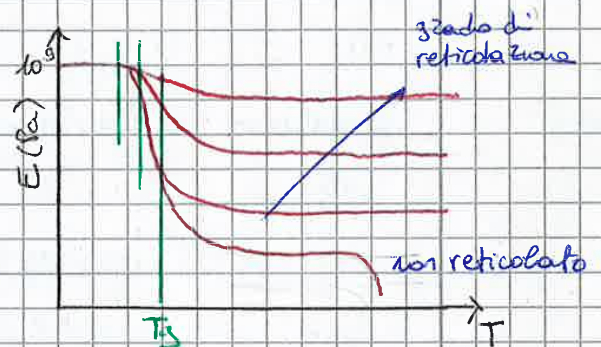
- caso resina epossidica con $T_g = 150^\circ\text{C}$
- $T < 30^\circ\text{C} \rightarrow$ fragile, segue Hooke
- $30 < T < 100 \rightarrow$ fragile con deboli deviazioni da linearità
- $T > 100^\circ\text{C} \rightarrow$ duttilità molto contenuta

• Ruolo del grado di reticolazione (legami trasversali)

Per $T < T_g \rightarrow E$ non influenzata dal grado di ret.

T_g non è molto influenzata dal grado di reticolazione, e si ha solo un modesto aumento.

Si tende ad avere una riduzione sempre meno sensibile di E al crescere della reticolazione perché si limita sempre + il movimento delle catene!



• **Tecniche di rafforzamento dei polimeri**

Si rafforzano le cat. meccaniche. Cosa porta alla deformazione plastica?

Lo scarrimento delle catene \rightarrow devo limitarlo.

Si hanno 4 metodi:

- ① per miscelazione
- ② per trafilatura
- ③ per formazione di legami trasversali (cross-linking)
- ④ per rafforzamento con particelle, fibre o tessuti

Vediamo nel dettaglio:

① Miscelazione

Si introducono dei nuovi polimeri, o meglio dei nuovi gruppi monomerici che si vanno a legare con il polimero presente. La resistenza ed E della miscela corrispondono al valor medio di quello dei singoli componenti

Materiali e calore.

(36)

• Dilatazione termica

La maggior parte dei materiali se sottoposti a riscaldamento, si espande. Per binari e ponti ci sono giunti di espansione.

• Deformazione reversibile in assenza di sollecitazione (dilatazione termica)

- Riprendiamo Gaudon-Morse (grafici pagine dopo)

- Andare a modificare la T del sistema, significa modificarne il livello energetico. Quindi induciamo un ΔE .

Ricordiamoci che l'aumento di temperatura, provoca un moto di agitazione atomica. A causa di questo perciò si può dire che l'agitazione è in realtà una oscillazione. Questa induce gli atomi a non avere una sola distanza di legame, ma bensì 2, una minima ed una massima!!!

- Per poter analizzare come il materiale reagisce alle variazioni di T , e quindi il perché vi sia una data variazione di volume, considero la media tra la massima e minima distanza di legame. (sono fisse!)

- Quando si toglie la variazione di T , il materiale tende a tornare allo stato di minima energia, e dunque la distanza di legame tende di nuovo ad " a_0 ". (Quindi ritorniamo ciò che era valido per le sollecitazioni meccaniche!) Ciò avviene perché tornando alla T ambiente le oscillazioni cessano, e quindi si torna allo stato di minimo.

- Per ogni variazione di T , si ha un $\neq \Delta E$ e quindi una diversa distanza media di legame. Ciò dipende dalle forme della curva di C-M.

- Più è simmetrica e stretta, minore sarà la differenza tra la distanza media ed " a_0 " con il variare di ΔE (e quindi di T).

Più è asimmetrica tale curva, maggiore sarà la differenza tra la distanza di legame media ed " a_0 " con il variare di ΔE .

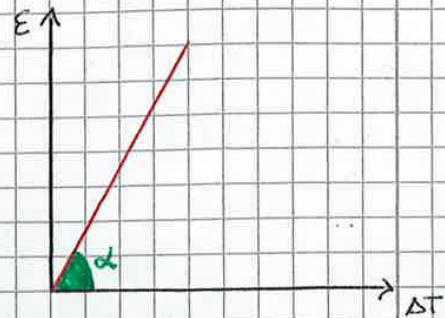
• **Coefficiente di dilatazione termica lineare α**

(37)

- si ritorna alle vecchie definizioni di deformazione valide in campo meccanico, dove la deformazione era data dal rapporto tra $\Delta L/L_0$. Ora consideriamo tale rapporto come:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T \rightarrow \alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

come si vede c'è un rapporto di proporzionalità diretta, che mi dà linearità.



- Ma sapendo che trattiamo tali deformazioni in maniera elastica, allora, ricordandoci che $E = \frac{\Delta L}{L_0}$, qui diciamo con un pedice T che la E è dovuta a deformazione termica:

$$E_T = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

- Definiamo in modo rigoroso α come il coeff. di dilatazione termica, ed indica la def. termica \forall variazione di 1K di Temperatura.

La sua unità di misura è $\frac{1}{K}$

- Quindi si capisce che per α elevati avremo legami deboli, mentre per α bassi avremo legami forti. Ma vediamo in schema:

Legami deboli

- ① basso punto di fusione
- ② basso E
- ③ alto α

Legami forti

- ① alto punto di fusione
- ② alto E
- ③ basso α

• **Capacità Termica C_p** (a pressione costante).

Quantità di calore necessaria ad aumentare di $1^\circ C$ la T di un'unità di massa.
 2 materiali \neq una di = massa hanno bisogno di \neq energia per aumentare la loro T di $1^\circ C$.

$$C_p = \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

$$\langle C_p \rangle = \frac{J}{kg \cdot K}$$



- Un altro aspetto di cui tener conto è l'inserimento di atomi 38 in soluzione solida, precipitati, ... perché tali fenomeni mi contrastano la conduzione e perciò vengono detti centri di dispersione.
Da lega a lega, a causa di ciò λ si modifica.
- Un altro modo di aumentare la capacità isolante è di rendere il materiale poroso. Infatti i vuoti (pori) sono pieni di aria, ottimo conduttore per eccellenza. Però sarebbe bene che i pori fossero isolati, cioè non comunicanti con l'esterno, in modo da non fare attraversare l'aria calda da una parte all'altra. [circondate solo da materiale].
- Però è da notare che se aumento la T, allora non favorisco il moto elettronico, perché aumenta globalmente il disordine, e ciò come visto, non è un bene in termini conduttivi. Perciò ad es. per i metalli, ad alte T, λ diminuisce. Questo per quel che riguarda ②.
- Per quel che riguarda il moto fononico ① invece si può dire che un aumento della T causa anch'esso un peggioramento di conducibilità, perché l'effetto di disordine dovuto all'aumento di T sovrasta l'effetto di vibrazione che è favorevole alla conducibilità.
- L'ultimo fattore, l'irraggiamento ③, cresce di importanza ad alte T, e va a bilanciare la perdita dovuta ad ① e ②. [vale per solidi vetrosi]
- **Diffusività termica (flusso termico transitorio) α**
È una misura della velocità di trasmissione di calore in un solido.
La T sulla superficie di riferimento varia nel tempo (transitorio)

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad \langle \alpha \rangle = \frac{m^2}{s}$$

La variazione di ΔT in questi casi avviene in modo lento e graduale.

- **Resistenza agli sbalzi termici o shock termico TSR**

In particolare per materiali fragili, si può avere frattura a causa di bruschi ΔT .

Tale fenomeno è molto importante quando si raggiungono le T critiche.

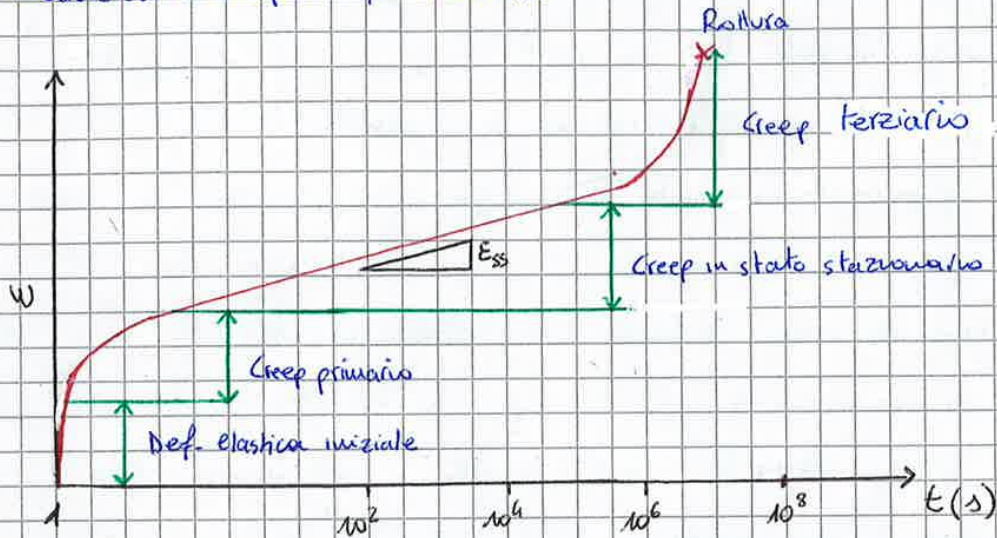
- Cos'è la T critica?

Metalli $\rightarrow T_{op} \approx 0,35 - 0,5 T_{fusione} (K)$

Ceramici $\rightarrow T_{op} \approx 0,45 - 0,7 T_f (K)$

- I ceramici resistono ad alte T rispetto ad altri materiali, ma anche loro hanno un limite! Arrivati ad un certo punto anche loro variano le proprietà.

- Condizioni di creep $\rightarrow T, \sigma = \text{costante}$



- Subito dopo aver subito la deformazione elastica, il materiale si trova in uno stato di deformazione ulteriore (creep primario), che si manifesta in maniera limitata.

- Successivamente si entra in una fase di creep in stato stazionario.

- Infine il materiale subisce così tante deformazioni, dovute agli stati precedenti, che giunge ad uno stato di creep terziario, il quale porterà al risultato finale: la rottura del materiale.

• Allora analizziamo il creep in stato stazionario (o secondario)

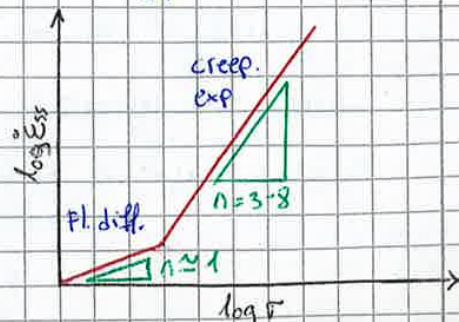
Si definisce $\dot{\epsilon}_{ss}$ la velocità di deformazione $\frac{d\epsilon}{dt}$ in stato stazionario.

A $T = \text{costante}$ $\dot{\epsilon}_{ss} = B \sigma^n$

n = esponente del creep.

$n = 3-8$ per σ elevati - creep esponenziale

$n \approx 1$ per σ contenuti - flusso diffusionale



Verificandosi per molte volte questo, il BGG subisce una modifica allungandosi nella direzione della sollecitazione. (40)

In tal modo si modifica la forma dei grani che subiscono σ , con una variazione delle sezioni portanti.

- Grazie ai processi diffusivi, si ha un moto dislocativo.

Perciò a questo punto, essendo le dislocazioni una zona instabile, le vacanze le vanno a circondare, favorendone il moto.

Quindi il reticolo si deforma.

- A causa di tutti questi movimenti, possono crearsi cavità dovute ad un assottigliamento dei BGG $\perp \sigma$, che poi portano a fessura. a causa di una intensificazione locale di σ , che erode il BGG che risponde a σ .

Ceramiche

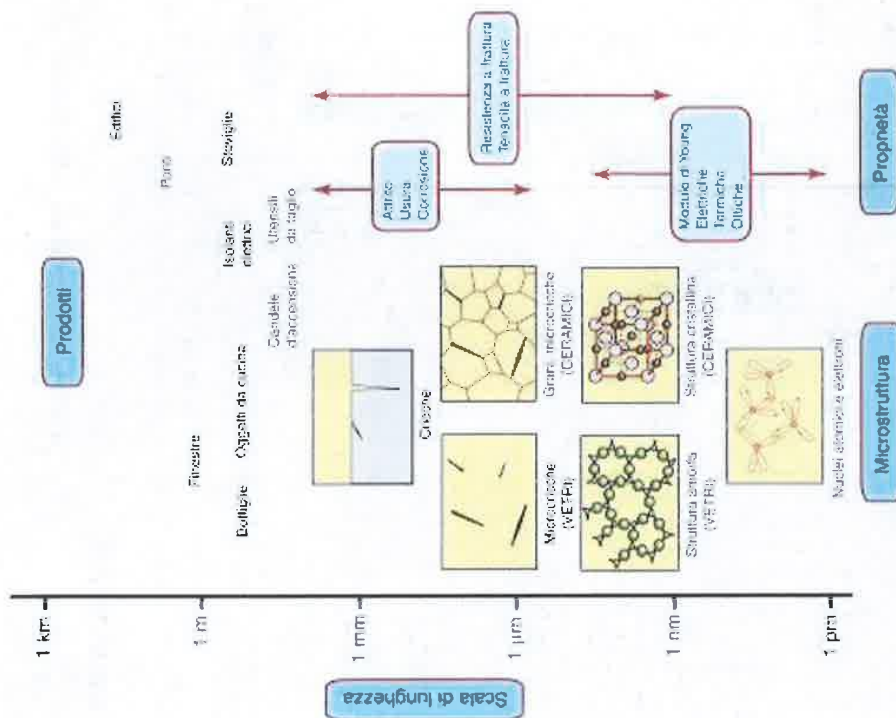


Fig. 19.2 Microstrutture dei ceramici e dei vetri: scale di lunghezza e proprietà. Ogni intervallo sulla scala delle lunghezze è un fattore 1000.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materiali ISBN 978-88-08-18126-3

Esercitazione 2 - reticoli

FIA
reticoli

Calcoliamo, ricavandoli, i FIA dei principali reticoli

CCC

$$\text{atomi per cella} = 1 + \frac{1}{8} \cdot 8 = 2 \text{ atomi}$$

Perché?

1 = atomo centrale

$$\frac{1}{8} \cdot 8 = \text{ogni atomo al vertice divide } \frac{1}{8} \text{ del suo totale.}$$

Perché non è detto che "a" sia noto, ci svicoliamo da lei.

Come faccio? Lo rapporto ai raggi atomici

La diagonale del cubo interseca 4 raggi (2 dell'atomo centrale + 2 ai vertici): $\sqrt{3}a = 4R$. Dunque

$$FCA = \frac{\text{Volumi per cella}}{V_{\text{cella}}} = \frac{2 \cdot V}{a^3} = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}} R\right)^3} = 0,68$$

CFC

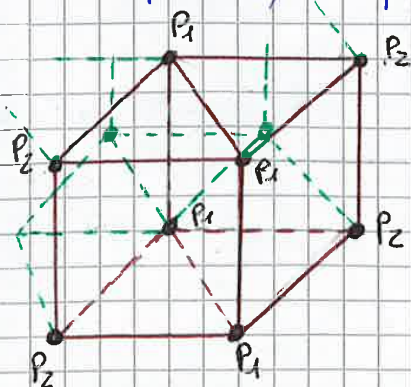
$$\text{atomi per celle} = \frac{1}{8} \cdot 8 + \frac{1}{2} \cdot 6 = 4$$

Ora considero la diagonale del quadrato: $\sqrt{2}a = 4R$

$$FCA = \frac{4 \left(\frac{4}{3} \pi R^3\right)}{\left(\frac{4}{\sqrt{2}} R\right)^3} = 0,74$$

EC

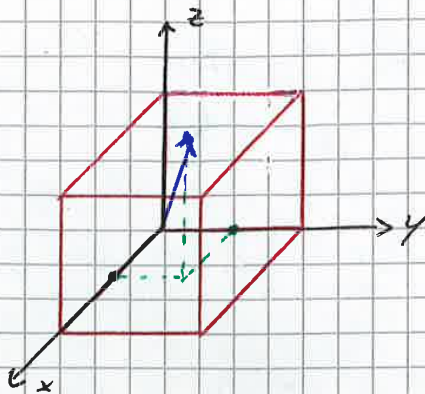
Ragiono con il sottosistema costituito non da 1 esagono, ma da 6 prismi, che formano 3 parallelepipedi



L'atomo al centro dell'esagono P1 vale $\frac{1}{6}$, perché è "toccato" da 3 prismi nell'esagono in disegua, e da 3 nell'esagono poggato sopra.

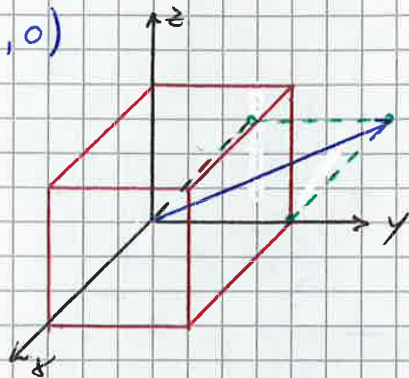
Es. 1 $[1 \ 1 \ 2]$

divido per 2 $\rightarrow [\frac{1}{2} \ \frac{1}{2} \ 1] \rightarrow F-I = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1) - (0, 0, 0)$



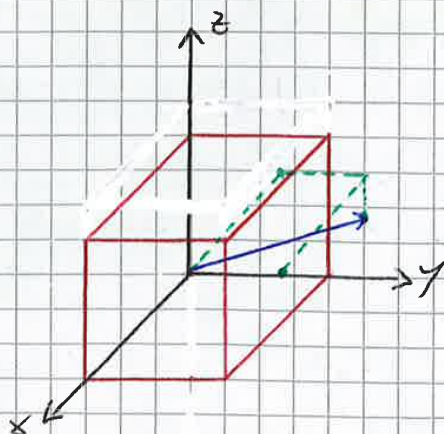
Es. 2 $[1 \ 1 \ 0]$

equivale a $(-1, 1, 0)$



Es. 3 $[3 \ 2 \ 1]$

divido per 3 $\rightarrow [1 \ \frac{2}{3} \ \frac{1}{3}] \rightarrow (-1, \frac{2}{3}, -\frac{1}{3})$

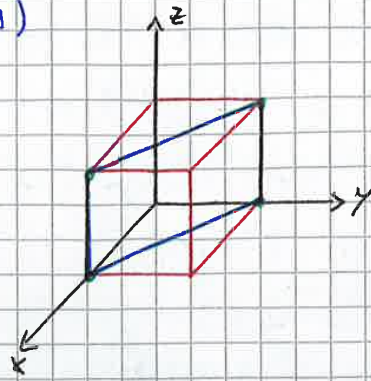


!! Nota importantissima !!

Se il vettore non ha origine in $(0,0,0)$, ma in (x_1, y_1, z_1) , generalmente, si usa sempre lo stesso metodo, e quindi? I: basta $(x, y, z) - (x_1, y_1, z_1)$.

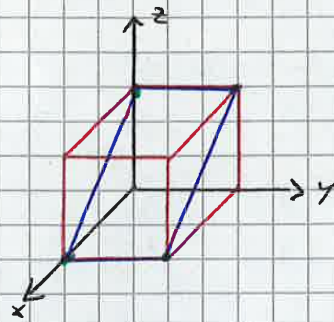
Es. 4

$$(110) \rightarrow (11\infty)$$



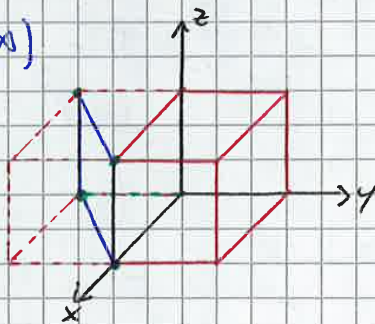
Es. 5

$$(101) \rightarrow (1\infty 1)$$



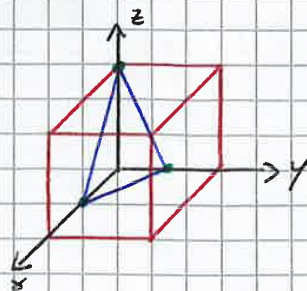
Es. 6

$$(1\bar{1}0) \rightarrow (1-1\infty)$$



Es. 7

$$(221) \rightarrow \left(\frac{1}{2} \frac{1}{2} 1\right)$$



• Densità atomiche

-lineare $\rho_p = \frac{\# \text{ atomi intersecati}}{\text{lunghezza linea}}$

-planare $\rho_p = \frac{\# \text{ atomi sezionati}}{\text{Area selezionata}}$

-volumetrica $\rho_v = \frac{\text{massa cella elementare}}{\text{volume cella elementare}}$

Sono riferimenti che conducono al FIA

Es. 2

Disegno (A) totalmente miscibili liquido e parzialmente allo stato solido
2 componenti

- T_A fusione = 2500 °C ; T_B fusione = 2000 °C

- punto eutettico :

al 40% di B e per $T = 1300$ °C

- Per tale T :

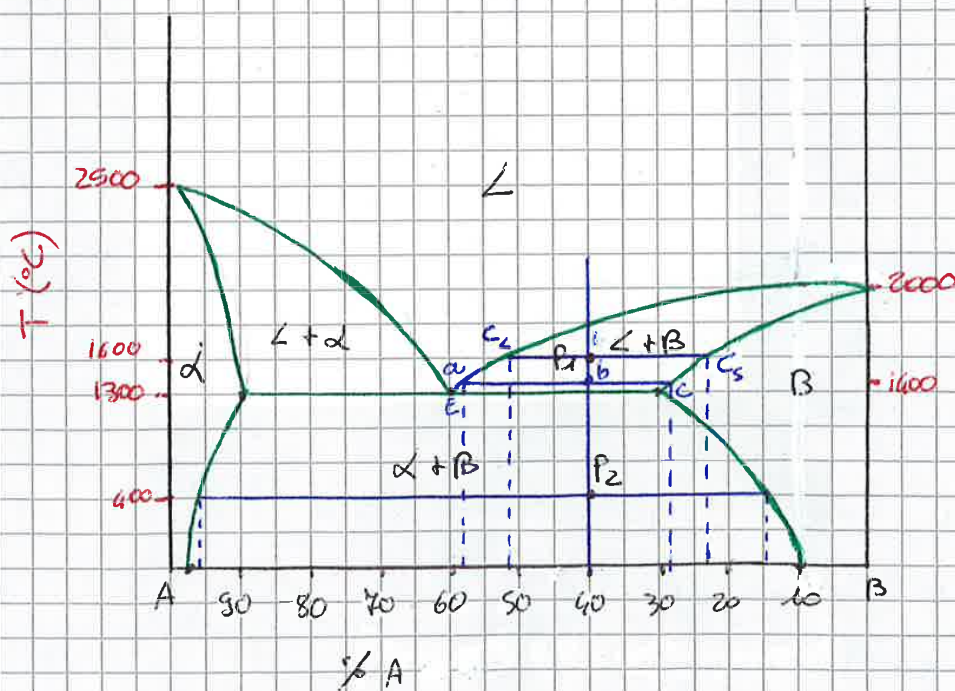
max solubilità di A in B (30% di A in B)

" " B in A (10% di B in A)

- A T ambiente :

solubilità di A in B 10%

" " B in A 5%



(B) liquido al 60% B

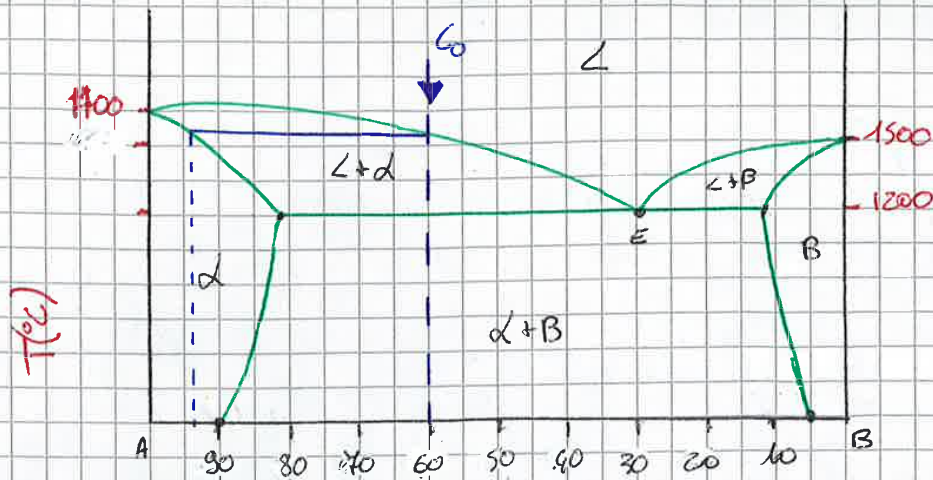
$T_1 = 1600$ °C ; $T_2 = 400$ °C [zona bifasica] ^{estreme}

(B.1) Varianza

c_1, c_2 (B.3) composizione delle fasi presenti

(B.2) numero e tipo di fasi presenti

(B.4) microstruttura



② Dato il componente al 40% B, simulare un raffreddamento e descrivere dettagliatamente l'evoluzione:

- composizionale
- microstrutturale

Esempio di risoluzione:

① $T = 2000^\circ\text{C}$ $C_L = 40\% \text{ B}, 60\% \text{ A}$ ○

② $T = 1400^\circ\text{C}$ $C_S = 0\% \text{ B} - 100\% \text{ A}$ ⊙
 $C_L = 40\% \text{ B} - 60\% \text{ A}$

③ $1300 \leq T \leq 1200 \rightarrow$ aumentano grani di A, e la composizione del liquido passa da C_0 e tende a C_E

④ $T = 1200^\circ\text{C}$
 $C_S = C_0$



8) Frattura fragile (Griffith)

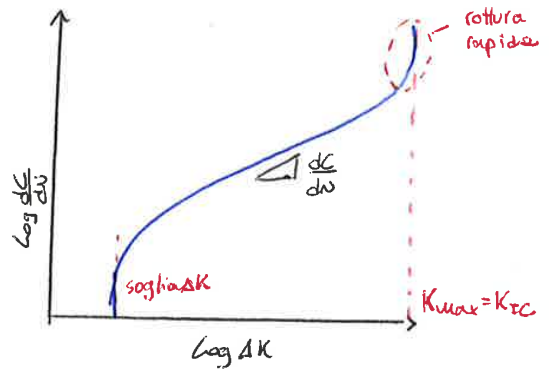
$G = 2\gamma$ $G =$ tenacità per materiali fragili
 $K_{Ic} = \sqrt{G_c 2E}$

9) Frattura duttile (Orowan ed Irwin)

$G_c = 2(\gamma + \gamma_p)$
 $K_{Ic} = \sqrt{EG_c}$

10) Fatica

- Legge di Basquin $\Delta\sigma: N_f^b = C_1$ (alti cicli) $b, C_1 = \text{cost}$
 - Legge di Coffin $\Delta\epsilon^{pl} = \frac{C_2}{N_f^c}$ (bassi cicli) $b = \text{coeff. Basquin}$
 $c = \text{coeff. Coffin}$
 - Paris $\frac{dC}{dN} = A \Delta K^m$ $A, m = \text{cost.}$
- valida per $soglia \leq \Delta K < K_{max}$



11) Dilatazione Termica α

$\alpha = \frac{\epsilon_T}{\Delta T} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$

12) Capacità Termica

$C_p = \frac{\Delta U}{\Delta T}$ energia per alzare di $1^\circ C$ 1 unità di massa

13) Conduttività termica λ

- 1ª Legge di Fick per flusso termico $q = - \frac{\lambda \Delta T}{\Delta x}$ $\Delta x =$ spazio di trasferimento
- legge di Fourier: $\lambda = - \frac{\Delta Q / \Delta t}{A(\Delta T / \Delta x)}$

Attitudine del materiale a trasferire energia termica da un sistema ad alta T. ad uno a bassa T.

14) Diffusività termica α

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ misura la velocità di trasmissione del calore in un solido

15) Resistenza a sbalzi termici TSR

$TSR = \frac{\sigma \lambda (1-\nu)}{E \alpha}$

16) velocità di deformazione in stato stazionario $\dot{\epsilon}_{ss}$

- $T, \rho = \text{cost}$ $\dot{\epsilon}_{ss} = B \sigma^n$ $n = 3-8$ per σ elevati - creep exp. A T costanti
 - $\sigma = \text{cost}$ $\dot{\epsilon}_{ss} = C e^{-\frac{Q_c}{RT}}$ $Q_c =$ en. att. creep - Monkman - Grant
- $\dot{\epsilon}_{ss} = r$ $t_c =$ tempo di vita