



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

NUMERO: 2129A-

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Tilloca Daniele

MATERIA: Scienza dei Materiali (teoria + esercitazioni) - 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.**

Scienze dei Materiali:

Lezione n°1

30/09/2016

Questa disciplina, piuttosto recente, è nata in quanto è fondamentale in tutte le occasioni di progettazione di un oggetto o di un componente scegliere (a seconda di quelle che sono le specifiche) il materiale più opportuno. I materiali non si comportano tutti allo stesso modo: ad esempio non hanno la stessa resistenza, sia nell'immediato sia nel tempo. Non hanno le stesse capacità d'interazione con l'ambiente circostante: per questo ed altri motivi a seconda dei casi va scelto il materiale più adatto alla realizzazione dell'oggetto.

La scienza dei materiali si occupa inoltre di creare nuovi materiali e cercare di migliorare quelli già esistenti (che sono circa 100.000): non essendo possibile conoscere tutti i materiali, vogliamo imparare a conoscere come la natura di un materiale possa poi prodursi nelle sue proprietà specifiche ed i processi lavorativi tecnologici che portano il materiale a modificare le proprie peculiarità. Raggruppiamo perciò per gruppi di materiali, uniti da un comportamento generalmente affine.

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

Un materiale non deve quindi rispondere di un solo fine strutturale, ma anche funzionale: per gli alimenti ad esempio è necessario talvolta un materiale trasparente che lasci vedere la merce all'interno della confezione. Di conseguenza una volta definite le proprietà richieste ad un materiale bisogna essere in grado di risalire a quale debba essere la sua natura.

Raggruppiamo i materiali in **famiglie**, sulla base di quella che è la **composizione** dei materiali:

{ **Metalli**

{ **Polimeri (ed Elastomeri)**

+

Compositi

{ **Ceramiche (e Vetri)**

teriale che viene prescelto.

- Processo produttivo -

Le proprietà finali di un materiale dipendono dal suo percorso produttivo, dalle metodiche di formatura adottate. A seconda del procedimento di fabbricazione usato, le proprietà del materiale possono variare esercitando un'influenza diretta sul rendimento, sull'affidabilità, sulla durata del prodotto.

Un processo è un metodo per formare, giungere o finire un componente.

- **Processi primari:** si realizza una forma del componente finale
- **Processi secondari:** interverranno sulla forma già ottenuta e servono per modificare (migliorare) aspetti superficiali e/o la geometria, nonché modificare le proprietà finali del componente.

Si noti che anche il processo primario differenzia i materiali in famiglie in base a quello che è il principio dietro ad una condizione di lavorazione: ad esempio sono differenti processi primari quelli per colata, per deformazione, metodi da polveri, ecc... e dipendono dalla natura del materiale grezzo. Anche i compositi hanno differenti tecniche di lavorazione primarie, legate proprio al fatto dell'infinità di materiali combinabili in differenti modi. I processi primari si differenziano per tipologie che riportano differenti "sottotecniche".

Una volta impostata la forma si procede con i processi secondari, che danno geometria e dettagli da una parte, miglioramenti delle proprietà mediante modifica della situazione a livello microscopico dall'altra.

Lezione n° 2

03/10/2016

Vedere lo schema di slide 12 lezione 1a.

Approcciare un materiale è complesso vista l'ampissima scelta a disposizione: tuttavia sulle prestazioni finali del materiale influisce non solo le proprietà di partenza (dipendenti dalla composizione e dalla microstruttura) ma anche il processo produttivo: il processo produttivo oltre a dare forma e geometria può modificare la struttura microscopica interna.

③

• **Giunzioni**: è possibile dover prevedere o inserire delle giunzioni, effettuabili a seconda di quelle che sono le tecnologie disponibili (rivetti, saldatura, giunzioni a caldo, giunzioni adesive). Si noti nel caso delle giunzioni adesive che si va a mettere a contatto dei materiali diversi: bisogna quindi prevedere il comportamento della giunzione.

• **Trattamenti superficiali**: può essere necessario modificare la superficie del prodotto, in quanto la superficie è un effetto fondamentale dell'oggetto: graffi, cricche, difetti sono generalmente concentrati sulla superficie, e possono pregiudicare la vita del prodotto.

La superficie è la parte che entra in contatto con il mondo circostante, e va quindi curata la sua conformazione, ancor più se si tiene conto del fatto che ottiene future superfici: possono fare risparmiare sul materiale in futuro, il che rappresenta il beneficio economico dell'avere una buona futura superficie. (Politura, Placcatura, Cromatura, Verniciatura, ecc..)

N.B.: per ogni categoria di processi primari e secondari esistono differenti lavorazioni pratiche (ad esempio: Stampaggio: iniezione/compressione/soffiatura).

N.B.: per ogni materiale vi sono processi indicati e processi da evitare/non utilizzabili.

La scelta di un materiale porta a scartare alcuni processi; viceversa intervenendo su una linea produttiva già formata non è possibile l'utilizzo di certi materiali.

Il progetto di un nuovo componente passa da un'analisi dei principi di tale nuovo componente, le sue funzioni e di conseguenza le dimensioni e i materiali anche i processi produttivi. Con questa mentalità si può quindi pensare alla **riprogettazione**, ossia l'adeguamento di prodotti più o meno datati all'avvento di nuovi materiali, nuovi processi, nuove funzionalità e richieste (ad esempio adeguamento del prodotto ad un materiale più leggero o più facilmente riciclabile).

- Classificazione dei materiali -

Abbiamo già visto la suddivisione primaria dei materiali in 4 grandi

essere liberi nell'intorno di questi atomi. Nel momento in cui più atomi metallici si vanno a legare tra di loro per dare vita ad un solido, la loro tendenza è quella di andare ad organizzarsi in strutture ordinate: i materiali metallici hanno una **struttura degli atomi ordinata** (vale a dire la formazione di cristalli). Tutti i materiali metallici possono essere definiti **cristallini**, cioè basati su porzioni in cui gli atomi hanno un ordine riconoscibile.

In realtà è anche possibile in determinate condizioni ottenere dei **metalli amorfi**, cioè non con un ordine a lungo raggio; è però una produzione molto difficile e costosa.

Nella categoria sono presenti anche le **leghe metalliche**: basate su atomi metallici, si hanno 2 o più tipi di atomi differenti i quali possono essere anch'essi metallici (maggior parte dei casi) o non metallici.

Si hanno leghe di alluminio (duraluminio: Al-Cu), leghe di rame (ottone, leghe Cu-Zn e bronzi, leghe Cu-Sn) e leghe di ferro (Fe-C) le quali dal punto di vista della conformazione e del comportamento possono essere molto varie fra loro seppur apparentemente simili.

Per quanto concerne le leghe di ferro, si nota come per bassi tenori di C si ottengono gli **acciai** e per maggiori tenori di C si ottengono le **ghise**: tra bronzo, ferro puro, acciaio e ghisa, ci sono enormi differenze a causa degli atomi di C e della loro disposizione e quantità.

- Proprietà dei materiali metallici -

Tutti i materiali metallici sono opachi (cioè non trasparenti alla luce visibile), ma lucenti. Sono ottimi conduttori di calore ed elettricità.

Possiedono elevate resistenze meccaniche: nel momento in cui sono sottoposti ad uno sforzo meccanico resistono molto bene. Al momento stesso sono resistenti ma anche **duttile**, ossia nel momento in cui i materiali sono deformabili (a freddo o a caldo) e subiscono delle deformazioni a causa di uno sforzo, rimuovendo lo sforzo il materiale mantiene la forma impressa. (Deformazione permanente, plastica).

Le temperature di fusione sono molto variabili: si posse da temperature relativamente basse di Zn e Al alle elevate temperature di Ti e W; in questo caso si vedono grosse differenze di comportamento all'interno delle stesse famiglie.

Anche la densità varia vastamente tra i metalli: si va dai $1,75 \text{ g/cm}^3$ del Ti al $19,3 \text{ g/cm}^3$ del W.

- Ossidico silatico, dove è presente il gruppo silatico SiO_2
- Ossidico non silatico, come Alluminio: Al_2O_3
- Non ossidico, come Carburo di silicio: SiC , Nitruro di silicio: Si_3N_4 .

Nella famiglia dei **NON OSSIDICI** sono presenti anche 2 "intrusi": **diamante** e **grafite C**. Si considerano intrusi in quanto non vi è presente l'elemento metallico, ed anzi sono idealmente puri. Entrano in questo gruppo a causa delle loro prestazioni e comportamenti, molto simili a quelli degli altri materiali del gruppo.

- Proprietà dei materiali ceramici -

Dal punto di vista delle condutture si possono definire dei buoni isolanti **termici ed elettrici**. Sono materiali **altofondenti**, cioè con delle temperature di fusione molto elevate, dell'ordine dei 2000° : per questo motivo per i materiali ceramici non pensiamo a processi di colata e fusione, bensì si ha una formazione partendo dalle polveri.

I materiali ceramici godono delle caratteristiche di refrattarietà: mantengono le caratteristiche chimico-fisico-meccaniche anche ad alte temperature. Resistono molto bene agli ambienti aggressivi (inerte chimica) e possono avere elevate caratteristiche meccaniche ed **elevata durezza**: la durezza è una caratteristica superficiale che misura quanto il materiale resiste ad essere intaccato o penetrato.

Un grosso difetto è la **fragilità**: si rompono dopo essersi deformati solo modo reversibile (deformazioni elastiche).

Tra i materiali ceramici c'è una peculiarità che è quella della **piezoelettricità**, ossia la capacità dei materiali di convertire l'energia meccanica in energia elettrica e viceversa: ad esempio si può recuperare energia dalle vibrazioni.

- Materie plastiche - Polimeri -

In altre categorie si va a valutare il singolo atomo, la sua disposizione nei piani e nel reticolo ma parlando essenzialmente di materiali cristallini. Per quanto riguarda i polimeri invece l'approccio è differente.

Si tratta di **materiali organici**, poiché basati essenzialmente su atomi

basi di Temperature di ramollimento. Hanno un'alta reattività dinamica e, solo per i materiali TP, hanno la possibilità di essere riciclati a fine vita. In realtà si possono riciclare tutti quei materiali che si possono portare allo stato fuso o ramollito per ridare una forma ad un oggetto.

- Riciclo a fine vita -

Il riciclo di un materiale è idealmente infinito qualora possibile, ma in realtà dipende molto da come il materiale reagisce al riscaldamento per riportarlo alla fusione. Nel caso di materiali polimerici tale riscaldamento induce delle piccole variazioni nelle catene: continuando a riciclare il materiale questo va a degradarsi. Anche gli additivi aggiunti in fase di riciclo vanno a modificare la composizione delle macromolecole. Per tale motivo all'interno del simbolo di riciclo si riporta il numero di quante volte il materiale può ancora essere riciclato.

- Compositi -

Tra i materiali di compositi trovano spazio anche alcuni materiali compositi naturali; tra tutti il legno. Dal punto di vista della composizione e disposizione delle sostanze componenti il legno ricorda fedelmente un composito di nuova generazione:

Il legno è costituito da una sostanza polimerica che prende il nome di legnina, che agisce come matrice, rinforzata da fibres cellulose (mentre nei compositi artificiali si hanno rinforzi in fibre di vetro o di carbonio).

I materiali rinforzati con fibre sono al momento i più conosciuti: le fibre danno al materiale elevata resistenza a trazione, rispondendo alle sollecitazioni al posto della matrice polimerica. Le fibre aumentano le proprietà meccaniche del composito tanto da rendere relativamente importante la scelta del polimero matrice. Le fibre possono essere inserite in maniera unidirezionale o come tessuti.

H H H H H H H H H H

- Densità e Modulo Elastico -

Sempre nell'ambito dello studio della disposizione di atomi, andiamo ad assumere questi come se fossero delle sfere microscopiche (Bohr). (11)

Laddove si registra il minimo livello energetico si ha il punto di massima stabilità: tutti i sistemi tendono naturalmente ad impiegare la minore energia possibile per rimanere nello stesso stato nel tempo.

Tutte le volte che non ci saranno interazioni esterne gli atomi tenderanno a mantenere tale posizione.

Nel momento in cui si hanno 2 atomi specifici: il valore di E_{min} per formare il legame dipende proprio da questi: ogni classe di materiale può essere associata ad una particolare curva di Lennard-Jones.

Sulle basi dei legami che possono instaurarsi in un materiale iniziamo a fare delle considerazioni sulle proprietà dei materiali:

Legami forti: Covalente, Ionico, Metallico

Legami deboli: dipoli (vanno ad instaurarsi fra porzioni cariche positive e negative che possono formarsi nelle catene)

- Legame metallico -

Atomi con cariche positive vanno a disporsi in maniera ordinata (struttura cristallina) e tutt'attorno gli elettroni di valenza formano la nuvola elettronica (elettroni liberi). È un legame che si crea in base a principi elettrostatici, dunque non è un legame che ha necessità di formarsi in un'unica direzione; si può formare nel momento in cui gli atomi entrano nella sfera d'azione ma senza avere direzioni preferenziali. (legame adirezionale).

È un legame energeticamente molto forte, quindi con un'alta energia in gioco.

Tali caratteristiche hanno un ruolo fondamentale sulle proprietà dei materiali:

- Energeticamente forte

- medio-alta Rigidezza
- medio-alta Resistenza a rottura
- medio-alta Temperatura di fusione
- basse dilatazione termica

Essendo un legame altamente energetico, affinché si spezzi bisogna ad esso fornire molta energia. Ad esempio è alta la temperatura di fusione.

- basse-bassissima resistenza a rottura
- basse-bassissime Temperature "di fusione"
- elevata dilatazione termica.

- Elettroni NON liberi (meccanismi di Trasporto termico / elettrico meno efficienti che nelle ceramiche).

- i migliori isolanti termici
- i migliori isolanti elettrici.

Lezione n°3

07/10/2016

Abbiamo iniziato a vedere che in base alla Tipologia di legame il materiale può avere una certa dilatazione termica, una certa rigidità ed una certa resistenza a rottura ed in base ad una direzionalità o adirezionalità del legame il materiale può prevedere un comportamento duttile o fragile.

- Rigidità -

Per capire cosa sia la rigidità di un materiale dobbiamo fare riferimento alle curve di Coulou-Horse, poiché queste dipende fortemente dal legame chimico presente. Concentriamo l'attenzione su due atomi di un certo materiale legati fra loro. Quando i due atomi si avvicinano ed iniziano a risentire della presenza dell'altro atomo, il sistema va a modificare la sua energia sulla base delle forze di attrazione / repulsione che, a seconda delle distanze fra i 2 atomi, vanno a bilanciarsi.

Parlando di rigidità, ciò che interessa è andare a capire e prevedere come un materiale risponde ad uno stimolo esterno.

Partiamo da un solido già formato: ci troviamo già nella condizione di massima stabilità, ovvero il punto di minor energia ad una distanza precisa tra gli atomi dette distanze di legame. L'energia in gioco nel legame e la distanza relativa tra gli atomi dipende dal legame: a seconda della tipologia di legame si hanno curve di C-H che si differenziano in base alle forze ed al valore di energia minima, in quanto a seconda delle interazioni che portano alla formazione del legame la variazione delle forze attrattive / repulsive man mano che gli atomi si avvicinano andrà a modificarsi, e dunque tutta la forma della curva va a modificarsi.

Il passaggio successivo alla formazione dei legami è preoccuparsi di cosa succede

2) Materiali che, sollecitati meccanicamente, hanno la possibilità di subire delle deformazioni elastiche e se la sollecitazione aumenta oltre un certo limite hanno la possibilità di subire deformazioni plastiche irreversibili. Se la sollecitazione continua ad aumentare anche questi arrivano a rottura. Tale comportamento si definisce **comportamento duttile**.

Differenza Tra **fragile** e **brittle**:

Fragile: materiale che si rompe sotto azioni (sollecitazioni, stress, sforzi) e si rompe in un attimo → materiale poco resistente

Brittle: materiale che si rompe avendo sperimentato solo deformazioni elastiche, reversibili (fragile come un ceramico).

N.B.: Non necessariamente un materiale "brittle" è anche "fragile".

Bisogna prestare quindi attenzione al fatto che entrambi i termini vengono tradotti in italiano dalla parola "fragile".

Il diamante subisce deformazioni solo elastiche (è brittle, fragile) ma non è certo poco resistente (non è fragile inglese). Il vetro da finestra è sia brittle che fragile, perché subisce deformazioni solo elastiche ma è anche poco resistente.

Brittle: materiale dal comportamento fragile

Fragile: materiale fragile

- Resistenza a rottura -

Anche la resistenza a rottura dipende dalle proprietà di legame atomico del materiale. Nel caso di resistenza a rottura si fa riferimento a sollecitazioni che il materiale non è in grado di sopportare, giungendo di conseguenza a rottura.

La resistenza a rottura, all'interno delle varie famiglie di materiali, può essere molto variabile. Inoltre nelle specifiche del materiale si trovano un numero (indicativo della sua composizione) ed i processi secondari cui è

stato sottoposto:

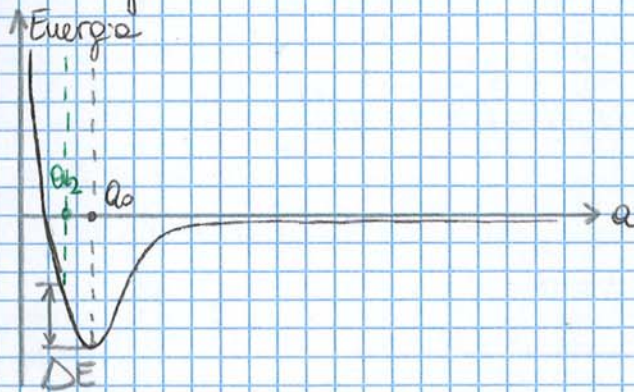
Acciaio 4340 TRIPPLATO E RINVENUTO

1760 MPa (trazione)

L'azione di trazione sugli atomi porta il sistema da a_0 a a_1 . Si noti però che il legame esiste ancora: gli atomi quindi non possono allontanarsi a distanza infinita. È cambiata solo la distanza di legame.

Annullando la sollecitazione esterna, annulliamo le forze che tiene separati gli atomi: le forze attrattive li riportano alla condizione di portanza (minimo energetico), con una azione di reversibilità.

Applicando una forza di compressione avvicinando i due atomi, si costringono i due atomi a stare più vicini di quanto vogliono, con una prevalenza di forze repulsive. Sulla curva di Gouou - Morse ciò significa tendere verso distanze inferiori ad a_0 . I due atomi passano da a_0 a a_2 a causa dell'energia imposta dall'esterno; anche in questo caso annullando le sollecitazioni le forze repulsive riportano il sistema alla distanza a_0 :



La deformazione elastica esiste solo finché si ha la sollecitazione esterna: annullare una sollecitazione significa annullare la deformazione elastica.

Le curve di Gouou - Morse spiegano la deformazione elastica, in quanto solo attraverso la variazione delle distanze in base alla variazione di energia si può spiegare la variazione di posizione degli atomi e quindi di forma complessiva del materiale.

Consideriamo due coppie di atomi legati da due differenti tipi di legame, e vediamo cosa succede applicando la stessa forza a due materiali diversi.

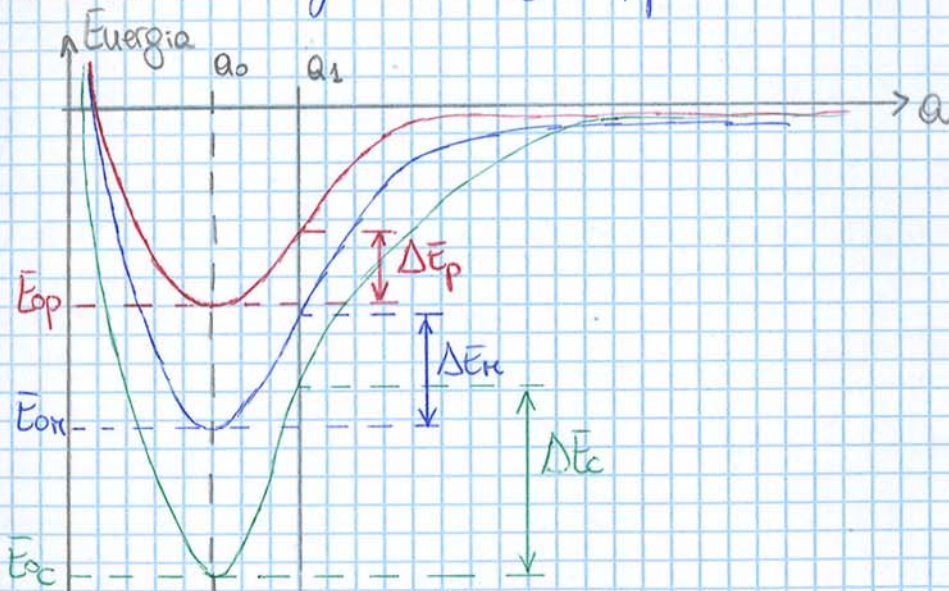
L'energia fornita ai due sistemi è la stessa, ma differenti sono le curve C-IT dei due legami, le quali regolano quella che sarà la deformazione: per due differenti sistemi, lo stesso livello di energia si traduce in differenti distanze di legame, dunque differenti deformazioni. In base a ciò si può affermare che ogni materiale ha una diversa resistenza, sotto forma di risposta elastica. Questa lunghezza di deformazione differente si traduce pienamente in una deformazione **macroscopica** diversa di materiale in materiale.

che è tipica di ogni materiale, detta **Modulo elastico (di Young) E**. Anche $[E] = [P_e]$ ma con scale differenti: i moduli elastici arrivano generalmente nell'ordine dei GPa.

lezione n° 4

10/10/2016

La legge di Hooke vale solo per deformazioni reversibili. Il modulo elastico E è una caratteristica intrinseca del materiale, la quale è costante in qualsiasi situazione. Il modulo E misura la resistenza al cambiamento di forma del materiale qualora sia applicata una sollecitazione che mantenga una deformazione elastica, ossia misura la **rigidezza** del materiale. È quello che affa il **legame**, con la sua energia, ed opporsi alla deformazione causata dalla sollecitazione. Più forte è il legame, più il materiale è rigido.



Consideriamo le 3 curve C-Il che associamo alle 3 grandi classi di materiali. La curva verde è associata ai ceramici, che in prevalenza contengono legami covalenti, ossia i legami dai più elevati livelli energetici. Nel grafico si vede come ai ceramici sia associato in assoluto il valore più alto di energia. Il "secondo posto" è del legame metallico tipico della famiglia dei metalli, anche esso legame primario ad alta energia.

La curva rossa è associata ai materiali polimerici ed ai legami di tipo secondario di natura debole presenti tra le catene.

NB: Per ogni legame considerato a_0 è differente; nella rappresentazione le tre curve sono state traslate in modo da far coincidere i valori di a_0 .

Formiamo una sollecitazione per ottenere in tutti e tre i casi una deformazione

METALLI	E (GPa)	CERAMICI	E (GPa)	POLIMERI	E (GPa)
W	400	Di ossido	1000	Melamminiche	6-7
Leghe Fe	210-235	WC	150-650	Polimidiche	3-5
Leghe Mg	45	SiC	450	PIVA	3,4
Leghe Ni	214-234	Al ₂ O ₃	370-390	Polistirene	3-3,4
Leghe Co	200-248	BeO	380	Epossidiche	3
Acciai	190-200	TiC	379	Policarbonato	2,6
Glisse	170-180	Si ₃ N ₄	290	Poliestere	1-5
Leghe Cu	124-150	H ₂ O	250	Polietilene	0,2-0,8
Leghe Al	69-79	ZrO ₂	160-240	Gomma	0,01-0,1
Leghe Ti	105-120	SiO ₂	72-94	PVC	0,003-0,01

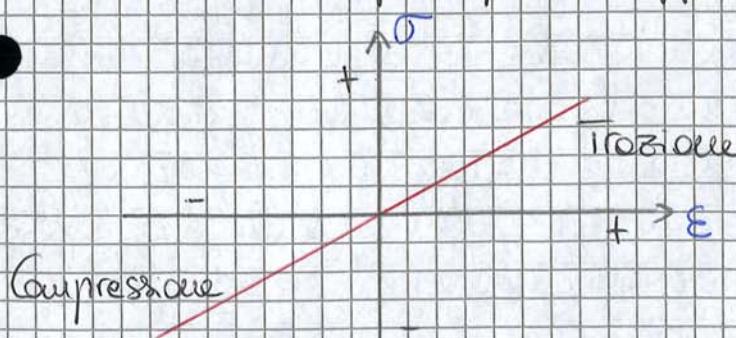
Il modulo elastico rappresenta la resistenza alla deformazione di un materiale: si vede come i suoi valori dipendano dal livello energetico del legame.

— Comportamento meccanico — *

Trazione uniaxiale: $\sigma = \frac{F}{A}$; $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} > 0$

Compressione uniaxiale: $\sigma = -\frac{F}{A}$; $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} < 0$

Essendo identici i principi ed i rapporti: σ - ϵ si può tracciare un grafico:



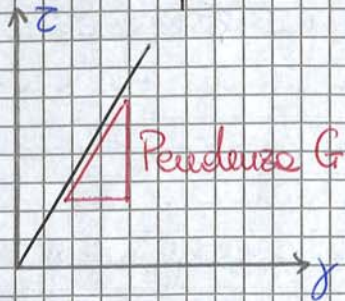
— Scamposizione in sollecitazioni semplici —

La forza agente sul materiale potrebbe essere diretta in qualsiasi direzione, dunque potrebbe non essere perpendicolare all'area di applicazione. Scamponiamo la forza in due componenti, perpendicolare e parallela all'area, trattando la componente perpendicolare come uno stress uniaxiale.

La deformazione è nella direzione parallela all'area su cui agisce la forza: si misura lo spostamento dello spigolo rispetto alla situazione iniziale.

● $\tau = G\gamma \Rightarrow G = \text{Modulo di taglio}$

Quindi in questo caso si ha diretta proporzionalità tra sforzo e deformazione:

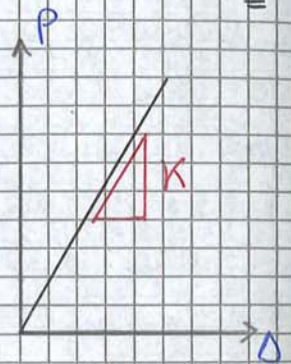


3) Pressione idrostatica P: Il materiale in questo caso risponde con una variazione di volume, essendo un'intera porzione di volume ad essere interessata.

Deformazione di volume: $\Delta = \frac{\Delta V}{V_0}$

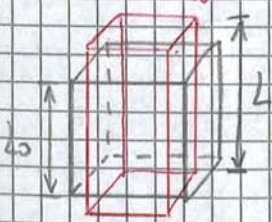
$P = K\Delta$

K = modulo di elasticità cubica.



Sono tutte costanti elastiche: si parla sempre e solo di comportamenti reversibili.

● - Il Coefficiente di Poisson -



Applicando una trazione uniaassiale il cubo di spigolo l_0 modifica la lunghezza originaria, raggiungendo l .

Tuttavia non varia solamente l : la sezione del volume considerato per vedere l'effetto della sollecitazione applicata non è costante.

Introduciamo il coefficiente di Poisson ν :

●
$$\nu = - \frac{\text{Deformazione trasversale}}{\text{Deformazione longitudinale}} = - \frac{\frac{\Delta e'}{e'}}{\frac{\Delta e}{e}}$$

ν serve a tenere conto delle variazioni descritte quando si applica (25)

si direbbe: $|e_x| + |e_y| = |e|$. Ciò significherebbe che applicando una sollecitazione il materiale subirebbe una deformazione lungo z secondo la legge di Hooke, una deformazione lungo x e y secondo Poisson, ma con $\nu = 0,5$ fatto ciò avverrebbe con una variazione nulla di volume, $\Delta V = 0$. Le deformazioni si bilancerebbero per dare una variazione nulla di volume.

Nel caso $\nu < 0,5$, ad esempio $\nu = 0,25$, si ha:

$$|e_x| = \frac{1}{4}|e| = |e_y| \Rightarrow |e_x| + |e_y| = \frac{1}{2}|e| \Rightarrow \Delta V > 0$$

Il realtà il coefficiente di Poisson di quasi tutti i materiali è compreso tra 0,5 e 0,05: per tutti i materiali abbiamo sempre valori inferiori a 0,5.

(vedi slide 17 lezione 25)

Applicando una sollecitazione ad un materiale, questo subisce una variazione di volume (più o meno importante). Le deformazioni di risposta non avvengono con volume costante.

I valori di ν più bassi appartengono ai materiali ceramici i quali, più rigidi, si deformano meno. I metalli hanno valori di $0,2 \leq \nu \leq 0,4$, mentre i polimeri sono quelli che più si avvicinano al limite di 0,5 per cui si avrebbe $\Delta V = 0$.

Questo succede perché la coppia di atomi non è isolata all'interno del materiale: nel reticolo cristallino l'atomo è legato con tutti gli atomi che lo circondano. Se la sollecitazione applicata in una certa direzione porta tutti i legami orientati lungo tale direzione ad aumentare la distanza di legame, questi stessi atomi hanno però dei legami che non risentono direttamente della forza, ma che devono continuare a mantenere nello spostarsi per assecondare la sollecitazione esterna. Spostandosi, allungando i legami perpendicolari fanno sì che gli atomi che gli sono accanto si avvicinano maggiormente. Ovviamente il discorso inverso vale per la compressione.

- Relazione tra le costanti elastiche -

Spesso nelle schede tecniche dei materiali sono presenti come parametri i sol. E e ν . G e K si possono ottenere dalle relazioni (approssimative):

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

Esercizio: Una barra d'acciaio lunga 150 mm ha sezione quadrata con lato $l = 20$ mm ha su di sé applicato un carico di trazione pari a 90 kN. Tale sollecitazione allunga la barra di 0,18 mm. Calcolare il modulo elastico.

Soluzione:
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{90 \cdot 10^3}{400 \cdot 10^{-6}} = 225 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 225 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{150,18 - 150}{150} = \frac{0,18}{150} = 1,2 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{225 \cdot 10^6}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 1,875 \cdot 10^{11} \text{ Pa} = 187,5 \text{ GPa}$$

H H H H H H H H H H

- Organizzazione degli atomi nei solidi -

La prima grossa differenziazione va fatta tra **materiali cristallini** e **materiali amorfi**. In generale i materiali metallici e ceramici sono materiali cristallini, sebbene in situazioni molto rare possono esistere metalli amorfi. Materiali amorfi sono quelli neutri alla sottobondola dei vetri: la grande differenza tra ceramici tradizionali / ingegneristica e vetri sta proprio qui. Un esempio pratico è quello della **silice** SiO_2 : da questa composizione si può ottenere del quarzo (cristallino) o vetro semplice (amorfo).

La formula chimica della silice vede una struttura che è ordinata in entrambi i casi a **orto raggio**, vista la direzionalità tipica del legame. A **lungo raggio** si notano però le differenze strutturali: nel caso del materiale cristallino i gruppi di molecole SiO_2 vanno a legarsi fra loro sempre a rappresentare la stessa figura. Nel materiale amorfo non c'è invece ripetibilità nella struttura, mancando così l'ordine a lungo raggio.

Questa differenza strutturale è legata alle **condizioni di processo**: quando un materiale si trova ad avere una struttura amorfa, esso rappresenta una condizione di **non equilibrio**. Gli atomi tendono ad una condizione di **minima energia**, cosa che si verifica quando si ha l'ordine: **la tendenza del materiale è di andare verso una condizione cristallina**.

Un cambiamento repentino e significativo delle condizioni ambientali (pressione, temperatura) porta il materiale a restare in situazioni di non equilibrio, mancando del tempo materiale per assestarsi in condizioni cristalline.

All'interno dei materiali cristallini si può avere ancora una doppia situazione: l'ordine a lungo raggio si può avere in porzioni limitate del materiale. (29)

Andando oltre si avrà un quarto piano che continuerà il percorso intrapreso di costruzione del solido con una successione differente di posizioni occupate.

Distinguiamo nel primo caso una struttura $ABAB$, nel secondo caso si ha una struttura $ABCABC$.

A prescindere dalla sequenza, ciò che è importante è il raggiungimento dell'obiettivo di massima occupazione del volume a disposizione. Le due configurazioni viste restituiscono il miglior impaccamento possibile.

Sebbene la natura imponga questo comportamento agli atomi, esistono configurazioni in cui il sistema non raggiunge la massima compattazione seppur queste siano ordinarie. Ad esempio si può avere:



Se un piano creato secondo questo schema, il secondo piano ha un'unica possibilità di piazzamento (sempre nell'ottica di minimizzazione degli spazi vuoti): piazzare le sfere del secondo piano negli avvallamenti lasciati liberi dalle sfere del primo. Continuando con il terzo piano si ha un'unica possibilità di piazzamento delle sfere, esattamente in corrispondenza con le sfere del primo piano ($ABAB$). Si noti che in questo caso la compattazione nel primo piano è secondo un ordine differente.

Sistemando gli atomi secondo questi principi si arriva a costruire il **reticolo cristallino**: parte del volume di un materiale sarà caratterizzato da un ordine che si ripete. L'identificazione di queste zone riesce in quanto si possono riconoscere delle figure geometriche standard dette **celle elementari**. Una minima porzione del reticolo cristallino si ripete all'interno dello stesso reticolo.

Tutti i reticoli cristallini che i vari materiali possono assumere possono essere ricondotti a 7 geometrie diverse delle **celle elementari**.

- Cella elementari -

Delle 7 geometrie elementari, la più semplice è il **sistema cubico**: i lati della cella sono uguali fra loro ($a=b=c$) e gli angoli della figura sono tutti angoli retti ($90^\circ = \alpha = \beta = \gamma$). Variazioni sui lati o/e sugli angoli portano ad altri sistemi.

In questo caso si ha un atomo su ogni vertice del cubo ed al centro di ogni faccia si ha un'altro serie di atomi. Rispetto al cubico semplice l'impaccamento è molto più compatto ed il reticolo è visibilmente molto più pieno. Costruendo il secondo piano si riconoscono i 2 atomi che si trovano al centro delle due facce laterali ed i 2 al centro della faccia anteriore e posteriore. Anche nel caso del CFC la successione d'impaccamento è ABAB perché le sfere che si trovano ai vertici anche qui occupano la stessa posizione rec. proc. Per ogni geometria vista i parametri geometrici da rispettare impongono una certa successione: in alcuni casi questa è obbligata.

Si vedano i 14 reticoli di Bravais slide 7 e 8 ec.

Nella grande maggioranza dei casi un materiale metallico ha celle elementari o CCC o CFC o Esagonale compatta.

Esagonale compatta: 1 atomo per ogni spigolo + 2 atomi al centro di ogni base + 3 atomi al centro della struttura esagonale. (Sistema altamente compatto)

La struttura esagonale si crea con una successione d'impaccamento ABCABC. Rispetto alla CCC il riempimento è molto maggiore: infatti le 3 strutture in esame sono identificate da un fattore d'impaccamento atomico in alcuni casi molto diversi fra loro.

- Fattore d'impaccamento atomico FIA -

Rappresenta la tendenza degli atomi nel costruire i reticoli al maggior riempimento possibile:

$$FIA = \frac{\text{Volume effettivamente occupato da atomi della cella}}{\text{Volume della cella}}$$

$$CCC = 0,68; CFC = 0,74; EC = 0,74$$

Per quanto gli atomi possano tendere a riempire il vuoto ed il volume del materiale rimangono sempre degli spazi vuoti (interstizi) i quali non necessariamente rappresentano un danno per il materiale: vengono usati per permettere le deformazioni (dislocazioni e risposte).

Si noti che le strutture mostrate corrispondono a reticoli: non sono solo congetture teoriche.

La densità dei ceramic è nel complesso inferiore a quella dei metalli.
 I **polimeri** hanno densità basso-bassissime: si basano su C, H, in alcuni casi O, N, S ma in generale atomi dal basso PA; gli spazi non sono occupati in modo compatto a causa delle catene, i vuoti o questi di disposizione ordinata. Per la maggior parte dello spazio questo è vuoto.

lezione n°6

17/10/2018

Riguardo all'argomento delle densità, va precisato il fatto che questo sia un parametro cui si darà tendenzialmente in seconda battuta: in primo luogo è generalmente prioritario valutare la resistenza e/o la rigidità di un materiale salvo poi, ove possibile, scegliere un materiale in caso più leggero nell'unità di volume.

- Proprietà INTRINSECHE e proprietà ESTRINSECHE -

E e ρ sono proprietà **intrinseche** del materiale, ossia dipendono dagli atomi all'interno del materiale e dal loro impaccamento. In particolare E dipende anche dal modo di legarsi fra loro degli atomi e dall'energia in gioco nel sistema. L'unico modo di cambiare E e ρ per un materiale è quello di varare la composizione: anche cambiando le sole disposizioni degli atomi non si avrebbero grossi cambiamenti. Ciò vale per tutte le proprietà intrinseche.

Per variare E e ρ si deve dunque andare verso una versione differente del materiale, ad esempio realizzando dei compositi: il risultato della miscelazione dipenderà anche dalle opportune fatte. Un'altra possibilità è realizzare delle **schiume**: le schiume sono materiali che presentano al loro interno degli **spazi vuoti**, dunque si ottengono svuotando il volume del solido sottraendo materia.

Per le proprietà **estrinseche** è "sufficiente" una modifica della microstruttura, e quindi si può parlare di proprietà controllabili. Non dipendono quindi dalla composizione a fondo (almeno non strettamente) e sono modificabili attraverso opportuni processi.

Torniamo alle proprietà intrinseche: nel caso delle schiume (materiali porosi) si inseriscono volutamente degli spazi vuoti all'interno del volume del solido considerato. Con questa operazione si può modificare E e ρ , ma si possono ottenere anche altri risultati: a seconda della funzione del materiale (36)

Tutte le volte che si ha l'allineamento in una direzione defuor delle fibre (lungo o corte) si ottiene un materiale con una risposta maggiorata nella direzione in cui sono disposte le fibre, nessuna identica o maggiorata in maniera poco efficace lungo tutte le altre direzioni. Con un composito di questo tipo, è d'obbligo in fase di progetto studiare accuratamente il posizionamento del componente o, meglio ancora, il posizionamento delle fibre all'interno del composito.

Se la sollecitazione esterna è allineata alla direzione di posizionamento delle fibre, allora queste potranno rispondere nel pieno delle loro possibilità allo sforzo; tuttavia generalmente la direzione di sollecitazione d'un componente non è univoca, ma può variare. La soluzione più semplice per ovviare a questo problema è progettare un materiale composito laminato: costituito nello

sovrapposizione di diversi strati di composito unidirezionali (con le fibre orientate secondo una direzione specifica e differente per ogni strato che compone il laminato). Aumentando lo spessore del laminato (quindi il numero degli strati) si può decidere di coprire diverse direzioni di sollecitazione, ma tutto ciò mediandosi sempre con gli altri strati: il risultato complessivo di un laminato non è mai uguale in una direzione particolare a quelle che sono le prestazioni di un "unidirezionale": a parità di spessore l'unidirezionale avrebbe per tutto lo spessore fibre in un'unica direzione.

Tutto ciò è prevedibile e studiabile, se si sfrutta in fase di progetto la **Regola della miscela**.

- Regola della miscela -

Deve prima di tutto essere stabilita la quantità di matrice e rinforzo usati nel materiale. Si può calcolare la frazione in volume della matrice f_m e la frazione in volume delle fibre f_f :

$$f_m = \frac{V_m}{V_m + V_f} ; f_f = \frac{V_f}{V_m + V_f} \Rightarrow f_m + f_f = 1$$

NB: La regola della miscela vale solo con rapporti volumetrici, non è valida se si prende in riferimento il peso.

Con queste premesse si può prevedere la proprietà del composito realizzato:

$$P_c = f_f P_f + f_m P_m = f_f P_f + (1 - f_f) P_m \quad \text{Proprietà composito}$$

Prendendo una proprietà specifica del composito, si avrà che tale pro = (38)

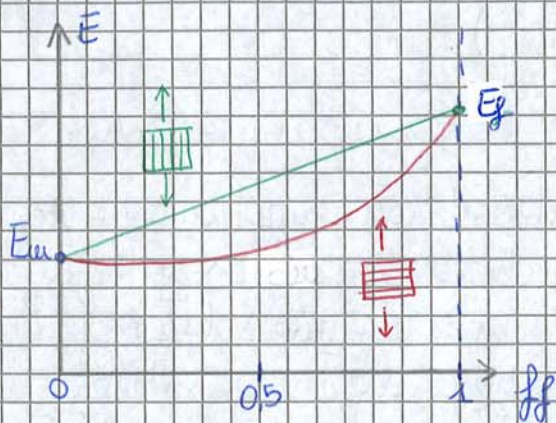
$$E_{\text{composito}} = f_f E_f + (1-f_f) E_m = \frac{f_f \sigma}{E_f} + \frac{(1-f_f) \sigma}{E_m}$$

La deformazione subito dalle fibre è diversa rispetto a quella della matrice. Sempre sfruttando la legge di Hooke scriviamo:

$$E_{\text{composito}} = \frac{\sigma}{\epsilon_{\text{comp}}} = \frac{1}{\frac{f_f}{E_f} + \frac{1-f_f}{E_m}}$$

La formula che ci dà E è diversa nei due casi: in queste condizioni non vale la regola della miscela. E può essere calcolato con tale regola solo se σ è parallelo alle fibre. Se σ è perpendicolare alle fibre allora questa formulazione usata si definisce **regola della miscela inversa**. Conoscere queste due regole serve a prevedere il comportamento del materiale composito.

Graficamente abbiamo:



Praticamente, se $\sigma \perp f$, fuo ed un 50% di fibre presenti nel materiale non si ha alcun beneficio sulla rigidità. Per $f_f > 0,5$ E cresce ma rimanendo minore del caso $\sigma \parallel f$.

NB Progettare un componente in materiale composito sbagliando il direzionamento delle fibre significa non ottenere alcun vantaggio prestazionale dalla presenza di fibre.

A parità di percentuale di fibre usate si ha una differente risposta da parte del materiale.

- Il progetto in leggerezza: le proprietà specifiche -

Nell'ambito aerospaziale quasi tutte le scelte di materiali tengono conto del peso del materiale: la leggerezza è tra i requisiti principali di selezione. Gli altri vi

oli da considerare sono meccanici o funzionali.

Una tecnica di analisi può essere quella delle **proprietà specifiche**: si valuta una proprietà del materiale rapportandola già alle densità del materiale. (40)

Sia i materiali metallici che i polimeri termoplastici hanno **comportamento duttile**, ma a causa di differenti motivazioni. Da una parte materiali metallici con struttura cristallina; dall'altra materiali polimerici definiti con struttura amorfa.

- Duttilità: metalli -

Hanno un ordine a corto e lungo raggio che porta a raggruppare secondo strutture cristalline e costituiti di **celle**, **direzioni** e **piani**. Il reticolo cristallino occupa idealmente qualsiasi spazio all'interno del materiale e ci permette di identificare posizioni specifiche in cui gli atomi si posizionano ordinatamente. In realtà questa è appunto una **visione ideale**: all'interno di un reticolo cristallino **reale** si trovano quelli che vengono definiti **difetti**.

Tali difetti (reticolari) possono interessare diverse zone del reticolo. Definiamo le tipologie di difetti in base alle zone (o porzioni) di reticolo che questi vanno ad interessare:

Difetti puntuali (odimensionali): Interessano un unico punto del reticolo; non hanno dimensioni \Rightarrow **Vacanze** - **Lacune** - **Atomi Interstiziali** - **Atomi Sostituzionali**

Difetti monodimensionali (di linea): Interessano una linea nel reticolo, dunque hanno una dimensione di riferimento (monodimensionali) \Rightarrow **Dislocazioni**.

Difetti bidimensionali (di superficie): Interessano intere superfici del reticolo, estendendosi su due dimensioni \Rightarrow **Bordi di Grano**.

Difetti tridimensionali (di volume): Interessano interi volumi del reticolo, estendendosi su tre dimensioni \Rightarrow **Inclusioni** - **Zone Amorse** - **Pori**.

Queste tipologie di difetti nella realtà sono molto comuni e largamente diffuse, allontanando sensibilmente la realtà dal caso ideale. Si noti che vari difetti possono coesistere nelle varie zone.

- Difetti puntuali: Vacanze -

La vacanza è un difetto reticolare che rappresenta una posizione la

Gli atomi inseriti dentro al reticolo devono rispettare delle regole affinché il loro inserimento possa avvenire. Ad esempio, lo spazio a disposizione per poter riempire il vuoto nel reticolo non è infinito: l'atomo inserito deve rispettare una regola relativa alle dimensioni. Se il raggio è molto piccolo, il reticolo quasi non si accorge della sostituzione, ma all'aumentare del raggio atomico l'atomo si "fa" spazio per poter stare nella posizione prefissata: gli atomi attorno si allontanano perché se possibile l'inserimento dell'atomo diverso nel piano.

L'atomo sostituzionale modifica il reticolo in una zona ristretta subito attorno al punto della sostituzione, che porta gli atomi attorno a modificare le proprie distanze di legame con gli altri atomi cui sono legati.

Tornando alla curva di C-IT per tale coppia di atomi, cosa succede al livello energetico del legame? Aumenta, perché su quel legame specifico si costringono 2 atomi a spostarsi da quelle loro verso distanze di legame minori a causa della compressione, con relativo aumento di energia.

Inserendo un atomo di raggio inferiore succederà l'opposto: il reticolo risentirà dell'atomo estraneo, ma con il reticolo che va a contrarsi cercando di riempire lo spazio rimasto inoccupato, con relativa allungazione dei legami degli atomi attorno.

Perturbare in un qualsiasi modo la condizione ideale del reticolo significa modificare il livello energetico in porzioni interessate da tali difetti.

L'atomo interstiziale va a posizionarsi nelle porzioni di volume rimaste inoccupate per limiti di imperfezione, quindi proprio negli interstizi. Il difetto è dunque la presenza di atomi in zone del reticolo che dovrebbero risultare vuote.

N.B. L'atomo interstiziale non occupa una posizione del reticolo, dunque non sostituisce un altro atomo. Riempiono zone che dovrebbero essere vuote con atomi i quali hanno dimensioni ridotte al punto da riuscire ad inserirsi negli interstizi.

Tuttavia, nonostante tale atomo occupi una zona altrimenti vuota, questo ha effetto sul reticolo: la zona vuota rappresenta un volume molto piccolo per cui un atomo che nasce ed inserirsi muoverà comunque gli atomi intorno per ricavare un minimo spazio ulteriore.

L'ordine perfetto si modifica di un minimo che va ad interessare solo

(L)

Un'altra conseguenza di questi difetti è quella di portare a dei **vantaggi** dal punto di vista **prestazionale** del materiale.

Un altro importantissimo fenomeno che si manifesta grazie ai difetti è la **diffusione allo stato solido**, meccanismo grazie al quale il materiale solido modifica la propria composizione (rimanendo allo stato solido) per mezzo dei moti diffusivi della materia.

- Soluzioni solide -

Si ripescano i concetti di soluzione liquida, quindi di **solvente** e **soluto**. Il solvente è la sostanza presente in maggiore quantità, il soluto è la sostanza aggiunta: nel caso delle leghe il solvente è l'elemento formante il reticolo ed il soluto l'elemento "estraneo" inserito o per sostituzione (**Soluzione solida sostituzionale**) o con occupazione degli interstizi (**Soluzione solida interstiziale**).

Soluzioni solide e lega rappresentano lo stesso concetto.

Nel caso di soluzione solida sostituzionale si hanno delle regole precise da rispettare: un atomo estraneo può occupare una posizione reticolare solo se valgono le regole di Hume-Rothery:

- 1) L'atomo che sostituisce e quello sostituito devono avere la stessa valenza, stesso reticolo cristallino, simile elettronegatività (per non interferire con i legami presenti)
- 2) Le differenze tra raggi atomici massime ammesse per la sostituzione è pari al 15%.

Quando avviene il processo sostitutivo di atomi nel reticolo, si possono avere 3 diverse situazioni: anche per le soluzioni solide si parla di **miscibilità** o **immiscibilità**, dipendenti dalla "compatibilità" degli elementi.

Si ha **miscibilità totale** (Cu e Ni), **miscibilità parziale** (Al e Cu), **immiscibilità**. Nel primo caso sono indistinguibili le sostanze; nel secondo le sostanze restano in qualche modo separate ed unite a seconda della zona; nel terzo caso la separazione è totale e non avviene miscelazione tra gli elementi.

Per una soluzione solida interstiziale l'unico requisito fondamentale

specie. I due solidi si sono mescolati. Tra loro in maniera completamente miscibile. Gli atomi di una specie devono inserirsi nel reticolo dell'altra specie e viceversa. Le vacanze semplificano le miscele fra due specie.

La forza principale del fenomeno della diffusione allo stato solido è il gradiente di concentrazione: partendo da una situazione in cui si hanno due concentrazioni nettamente differenti delle due specie, si tende ad una situazione in cui la concentrazione di ogni specie risulta essere costante. Con un elevato gradiente di concentrazione molto elevato (dunque negli istanti iniziali) il fenomeno sarà molto più rapido; il fenomeno rallenta quando sub nelle zone più lontane dall'interfaccia si hanno ancora atomi di un'unica specie, i quali necessitano di molto più tempo e fatica per ridisporsi nel solido di soluzione.

● La diffusione allo stato solido è regolata dalla Legge di Fick:

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

Il flusso atomico (la quantità di materia che in una unità di tempo riesce a fluire attraverso un'unità di superficie) nella direzione x , passando da un materiale A ad un materiale B dipende dal gradiente di concentrazione $\frac{dc}{dx}$ secondo una costante definita come coefficiente di diffusione:

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} = \text{coefficiente di diffusione o diffusività}$$

● La diffusività è tipica di ogni materiale e dipende dall'energia di attivazione del moto atomico Q , dalla costante dei gas R e dalla temperatura T . Attraverso D capiamo quanto più essere importante la temperatura nel meccanismo di diffusione allo stato solido.

- Alcune conseguenze della diffusione allo stato solido -

Una via doppia per trasformare Fe in acciaio consiste nella cementazione (detta anche carburazione). In questo caso si cerca di far diffondere gli atomi di C all'interno del reticolo del Fe (Fe solido, C gassoso). Grazie ai fenomeni diffusivi allo stato solido gli atomi di C presenti in grande concentrazione sulla superficie attorno al materiale solido riescono man mano a penetrare all'interno del reticolo, occupando gli interstizi e portando alla formazione dell'acciaio. (48)

CFC sono minori rispetto alle CCC. CCC ha un interstizio più piccolo, ma nel complesso più spazio vuoto. La CFC ha localmente spazi più grandi ma nel complesso meno volume occupabile da atomi interstiziali.

Il raggio di C è $r_C = 0,077 \text{ nm}$: per entrambe CFC e CCC siamo al di sopra dello spazio disponibile. In entrambi i casi gli atomi di Fe devono essere costretti a spostarsi, ma è possibile il suo inserimento: questa azione di spostamento riduce gli altri interstizi che si trovano attorno. Il secondo atomo di C andrebbe piazzato nell'intervallo laddove sono rimasti interstizi abbastanza copienti: nella CFC la possibilità di piazzare "vicini" due atomi di C è maggiore rispetto alla CCC, ossia nella CCC l'effetto di restringimento degli atomi del Fe (e di riduzione degli interstizi) ha raggio molto maggiore che nella CFC.

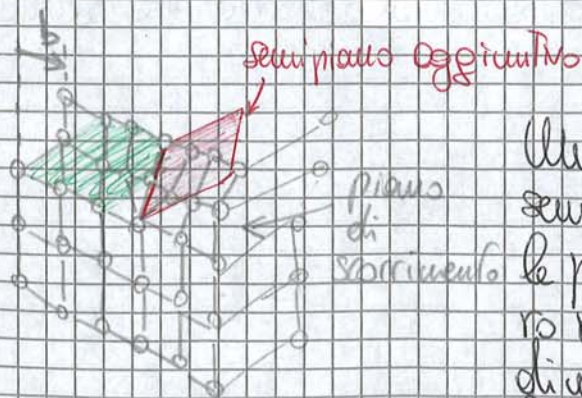
Solubilità intermedia di leghe significa avere (o meno) la possibilità di inserire l'atomo estraneo nella posizione reticolare o nella posizione interstiziale. CFC solubilizza quantità maggiori di C nel reticolo del Fe rispetto a CCC.

Sia noti come il discorso non è centrato sul primo atomo di C piazzato ma sulle conseguenze dell'inserimento di tale atomo nelle prime posizioni nelle altre posizioni disponibili.

- Difetti di linea - dislocazioni -

Un difetto di linea è un difetto che interessa una linea specifica del reticolo (difetto mono dimensionale).

La dislocazione consiste in un **semipiano aggiuntivo** di atomi che perturba una zona del reticolo rispetto ad un'altra, creando degli **stati tensionati** nel suo intorno.



Una fila di atomi in questo caso rappresenta un semipiano aggiuntivo: il difetto si crea quando tale piano è presente solo in una porzione dell'intero reticolo. In tale zona si ha la concentrazione di uno stato tensionato in quanto il reticolo è fortemente modificato.

Osservando dall'alto il reticolo è regolare, piano, con distanze omogenee fra gli atomi, e lo stesso nella zona inferiore del reticolo. Il grosso della tensione è

La zona inferiore del reticolo resta fissa, la zona superiore si muove secondo la direzione indicata (perpendicolare rispetto al piano di scorrimento).

- Nelle realtà nei materiali si manifestano anche dislocazioni miste, con caratteristiche sia a spigolo che a vite.

La cosa più importante di queste dislocazioni è il loro movimento: lo loro presenza induce variazioni notevoli dello stato tensionale. In questo caso si hanno degli atomi in serie di rettilinee coinvolti nella variazione del loro stato energetico i quali appartengono a vari piani: la variazione dello stato energetico all'interno del reticolo è molto più importante rispetto a quella osservata nel caso dei difetti puntuali.

Questa è sicuramente una condizione non gradita al reticolo: non appena si manifesta la possibilità il reticolo cerca di minimizzare lo stato tensionale

- indotto dalla dislocazione e, partendo da un reticolo dove è presente un semi piano aggiuntivo, si porta in una condizione in cui il semi piano aggiuntivo viene trasferito agli estremi del reticolo, in modo che lo stato tensionale vada a smorzarsi. Ciò è possibile mediante un'azione esterna, in particolare una sollecitazione tale da trasformarsi in una forza di taglio nella zona dove è presente la dislocazione.

NB: esternamente non dev'essere necessariamente una forza di taglio: anche stress uniaxiale possono tradursi in sforzi di taglio a seconda del "punto di vista" del reticolo e della dislocazione.

- Il semi piano aggiuntivo riesce, mediante tali sforzi di taglio, ad attraversare il reticolo.

Lezione n° 8

28/10/2016

Abbiamo visto come il reticolo ideale e perfetto descritto fu dall'inizio, in realtà non esiste: i materiali reali presentano una serie di difetti, di importanza ed impatto differenti fra loro.

Inserendo un elemento estraneo costituiamo una soluzione che prevede i due elementi allo stato solido: si hanno le soluzioni solide sostituzionali (con atomi sostituzionali) e le soluzioni solide interstiziali (con atomi interstiziali).

- Affinché la soluzione solida venga a crearsi vi sono delle regole (più semplici nel caso della soluzione solida interstiziale).

diatamente. Ci si ripete "gradino per gradino" finché la dislocazione arriva poi al fondo del reticolo. (vedere slide 23 lezione 3A).

Il momento dislocativo è un concetto proprio della presenza del semipiano aggiuntivo, poiché nella configurazione iniziale si nota che la distanza tra A e C è inferiore (a causa dell'inserimento del semipiano) alla distanza tipica tra due atomi nel reticolo: per questo motivo basta una piccola spinta per avviare il movimento. Se gli atomi si trovassero nelle loro posizioni ideali sarebbe molto più difficile.

NB: Il meccanismo di rottura e creazione dei legami che permette lo scorrimento avviene contemporaneamente su tutti i piani interessati.

Fuore abbiamo fatto riferimento alle classi di materiali metallici, ma cosa accade quando tali difetti si manifestano per differenti tipologie di materiali?

Le dislocazioni sono difetti lineari che appartengono al reticolo cristallino, dunque tutti i materiali cristallini presentano questo tipo di difetto. Le dislocazioni sono dunque presenti in metalli e ceramici. Vi sono però delle differenze nella reazione tra un materiale e l'altro che diventano fondamentali: soprattutto a riguardo del meccanismo di scorrimento.

Quando una dislocazione deve scorrere all'interno del reticolo bisogna considerare le condizioni al contorno e le situazioni che più favoriscono il movimento.

Valutiamo in primo luogo cosa cambia nel movimento dislocativo in base a quanto il reticolo sia più o meno compatto.

Il movimento è facilitato dalle forze attrattive che gli atomi instaurano fra di essi. Immaginando di fare scorrere un piano rispetto a quello adiacente, questo porterà il semipiano aggiuntivo al termine del reticolo: lo spostamento del semipiano da A a B dipende dal passo che è necessario fare, il quale a sua volta dipende dalle posizioni degli atomi. Più il piano presenta una densità atomica alta, più lo spostamento del semipiano da A a B è ridotto (piccolo passo). Se il passo è piccolo allora l'energia necessaria per garantire il passaggio sarà bassa.

Se si considerano degli altri piani, il passaggio può avvenire (ed avviene) per distanze di scorrimento maggiori: ciò significa impiegare più energia per compiere il passo, il movimento avviene in obliquo da un piano all'altro.



CFC $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ 12 sistemi di scorrimento

Anche in questo caso si ottengono 12 sistemi di scorrimento.

Quando la componente parallela (che si considera quando è presente la selezione di taglio) va ad agire su uno dei sistemi di scorrimento la dislocazione si muove facilmente: maggiori sono i sistemi di scorrimento più è facile che uno dei piani riesca a trovarsi orientato nel verso giusto per subire una selezione di taglio. La probabilità che una minima selezione di taglio esterna induca un movimento aumenta.

● Nell'esagono compatto il piano di scorrimento è uno soltanto, lo $\{0001\}$.



EC $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ $1 \times 3 = 3$

Le direzioni di scorrimento per quel singolo piano sono 3, dunque l'esagono compatto presenta solo 3 sistemi di movimento.

Risulta che nelle versioni CCC e CFC della cella elementare ed in tutti i materiali che su tali celle si basano il moto dislocativo avviene in maniera molto più semplice (quindi con minori selezioni) rispetto a quanto avviene con l'esagono compatto.

La combinazione sulle bozze delle 3 celle considerate (più diffuse per i materiali metallici), tenuto conto dei fattori di impacchettamento e dei piani di scorrimento permette la definizione di una **scala di duttilità**.

Facciamo riferimento alla duttilità poiché questo consiste proprio nella capacità del materiale di varare le posizioni interne del reticolo senza giungere a rottura per effetto di selezioni esterne.

Per avere una deformazione che rimane invariata nel tempo dobbiamo spostare gli atomi e rompere i legami: mentre la dislocazione avanza rompiamo e formiamo nuovi legami. La deformazione plastica è proprio una conseguenza del moto delle dislocazioni.

Si ricreano immediatamente i legami poiché lo scarramento dovrebbe avvenire con velocità infinite ed essere istantaneo. Realisticamente dovremmo rompere tutti i legami, far scorrere il piano e riformare i legami: l'energia necessaria sarebbe eccessiva, dunque i ceramici tendono a non permettere lo scarramento, preferendo un reticolo instabile all'impiego di così tanta energia per rompere i legami e poi riformarli.

Lo per i ceramici ionici che per i ceramici covalenti le dislocazioni esistono ma non si muovono, motivo per il quale i ceramici hanno comportamento fragile.

- Difetti di superficie -

I difetti di superficie sono i **bordi di grano**. Per quanto riguarda i materiali cristallini si hanno i **monocristalli** ed i **policristalli**, dove per questi ultimi l'ordine e l'orientazione è relativa solo a porzioni di materiale. Ogni porzione viene detta **grano** ed ognuno ha il reticolo orientato in un determinato modo. Il grano adiacente possiede un reticolo basato sulla stessa cella di orientare ma orientato diversamente.

Nelle **zone di confine** si crea di fare incastrare queste diverse orientazioni dei reticoli: si creano delle zone difettuali dette **bordi di grano**: sono difetti di superficie e poiché è tutta la superficie che racchiude la porzione di volume detta "cristallo" o "grano".

Qualcuno posto al confine dovrebbe rispettare lo scarramento di legami e l'ordine di entrambi i grani: **la cosa più semplice è accogliere alcuni atomi** di superficie di separazione presenta uno stato energetico lontano dalla stabilità, rappresentando un difetto.

Tutto ciò si traduce, in termini di disposizioni di atomi, in zone al centro di ogni grano le quali vanno verso la massima stabilità possibile e zone di superficie dove, per cercare di rispettare le regole di ogni grano, hanno delle posizioni che poi non rispettano per nulla le regole, trovandosi ad essere fortemente instabili. Centralmente il grano è "indisturbato", dunque più assessoria come meglio riesce; più ci si avvicina ad un altro grano gli atomi risentono di "disturbi" e vanno ad occupare posizioni differenti da quello che dovrebbe essere un reticolo ideale.

Si noti che all'interno del grano possono esserci difetti puntuali e di linea, il difetto di superficie non implica l'assenza di altri difetti.

zone di confine tra questi volumi presentano una situazione di instabilità. Gli atomi non riescono a trovare delle posizioni che vadano bene per entrambi i reticoli adiacenti: il confine tra un grano e l'altro rappresenta una situazione in cui possono esserci delle vacanze o gli atomi presenti all'interno vanno ad avere un'energia superiore all'energia E_0 . Questa situazione riguarda tutti gli atomi che appartengono alle superfici di confine (bordi di grano), definendo così i difetti bidimensionali. Tutto il confine del grano ha situazioni di stabilità energetica diversa da quella che gli atomi vanno cercando. Questi difetti avranno poi effetto sulle qualità macroscopiche del materiale.

- I difetti tridimensionali: porosità, inclusioni, precipitati -

- Porosità -

● Avere un poro significa avere uno spazio completamente vuoto all'interno del materiale. I pori e la possibilità di avere la versione porosa di un materiale possono essere un vantaggio in quanto per alcune applicazioni si ha la necessità di avere degli spazi vuoti all'interno del materiale (filtri, applicazioni biomedicali).

All'interno del materiale si inseriscono dei pori i quali possono avere dimensioni differenti (a seconda della tecnica utilizzata per crearli): con la loro presenza si modifica il modulo elastico del materiale attraverso la seguente formula:

$$P = \text{porosità} = \frac{V_p}{V_{tot}} \Rightarrow E = E_0 (1 - 1,9P - 0,9P^2)$$

● $\sigma_r = \sigma_0 e^{-nP}$; $n = 6st$ (dipende dal fattore di forma del poro)

Dove si noti che P è il complementare di p in percentuale del 100%: se p è il volume occupato sul volume totale, P è il vuoto lasciato nel volume totale. E_0 è il modulo elastico del materiale a normale densità. Attraverso la conoscenza della percentuale di porosità si può prevedere anche la resistenza di un materiale poroso: applicando una sollecitazione ad un materiale la materia presente al suo interno reagisce (in maniera elastica e/o plastica a seconda del materiale), dunque lasciando degli spazi vuoti staccando della materia che reagisce alle sollecitazioni esterne. Non ci si può quindi aspettare che la resistenza non ne sia influenzata. In questo caso è una legge esponenziale quella che lega la resistenza del materiale poroso al materiale "classico".

NB: la forma del poro influisce sulla resistenza del materiale: l'ideale sarebbe $\textcircled{60}$

Si immagina di avere un reticolo in cui è presente una dislocazione ed un difetto interstiziale. Nel momento in cui c'è la possibilità attraverso la diffusione allo stato solido (aumentando la temperatura) il difetto interstiziale si muove nel reticolo per andare a posizionarsi in prossimità della dislocazione. Questo perché, considerando i due difetti distanti, si ha all'interno del reticolo una zona attorno al difetto interstiziale che si è discostata dalla situazione di stabilità energetica: gli atomi attorno si allungano per fare spazio all'atomo interstiziale, risultando in uno stato di **compressione** rispetto agli atomi vicini a causa delle ridotte distanze di legame. Nell'intorno della dislocazione si ha una situazione di compressione nella prossimità degli atomi che fanno terminare il semipiano aggiuntivo, mentre nella parte superiore il reticolo si trova in uno stato di sollecitazione a trazione, poiché gli atomi per assecondare gli atomi superiori cui sono legati stirano i legami presenti tra loro.

Così la diffusione allo stato solido il materiale può bilanciare la situazione: cerca di bilanciare la compressione che comporta l'atomo interstiziale con la zona di trazione che si trova sotto la dislocazione. L'atomo interstiziale si posiziona quindi tra quegli atomi che, a causa della presenza della dislocazione, sono più distanti tra di loro: il resto del reticolo si potrà dunque porre nelle condizioni di massima stabilità.

La tendenza del reticolo è sempre questa: anche con un atomo sostituzionale qualora sia possibile attraverso lo stato solido modificare le posizioni dei difetti l'atomo sostituzionale (o di un'impurità maggior rispetto a quelle del reticolo - compressione nel suo intorno) va a posizionarsi anche in questo caso nella zona che è in trazione.

Se l'atomo sostituzionale ha dimensioni un riferimento rispetto al resto del reticolo gli atomi sono in trazione nel suo intorno (cerca di avvicinarsi): la diffusione allo stato solido porta il difetto puntuale nella zona di compressione.

La stessa cosa succede quando una dislocazione si trova in un materiale policristallino: la dislocazione non riesce a muoversi semplicemente con il meccanismo di diffusione allo stato solido (in quanto deve muoversi un intero semipiano) ma, all'applicazione di una sufficiente sollecitazione di taglio, tende ad andare al termine del reticolo del grano in cui è contenuta finché non giunge al bordo di grano; al bordo di grano la dislocazione trova una situazione di instabilità e qui si blocca, accumulando però quanto più possibile i difetti nella stessa porzione di reticolo. Nel complesso è preferibile avere una zona più perturbata e tutto il resto in condizioni ideali di stabilità.

Questo stesso principio vale per i precipitati.

Tutte queste prove vengono condotte seguendo delle specifiche normative (EN, UNI, ISO, ASTM, ...) le quali definiscono per ciascuna particolare prova tutte le condizioni in cui tali prove vanno effettuate.

- Prove statiche -

Sono caratterizzate dall'applicazione di una sollecitazione al materiale la quale cresce nel tempo fino a quando il materiale giunge a rottura. La sollecitazione si può applicare:

- a Trazione
- a compressione
- a flessione
- di durezza

Si noti che solo nelle prove di durezza non si arriva alla rottura del materiale. Trattasi di una prova non distruttiva che coinvolge la superficie del materiale.

- Prove meccaniche di Trazione -

Si registra la risposta del materiale ad una sollecitazione, ossia la sua deformazione. In buona sostanza, durante la prova si vanno costruendo le curve σ - ϵ del materiale. Secondo normativa il provino deve avere una forma specifica (soprattutto nel caso di materiali metallici): in realtà le normative in generale variano in base alla tipologia di materiale da analizzare. La forma richiesta può cambiare a seconda che il materiale sia metallico, polimerico, ceramico.

Nelle prove a trazione generalmente i provini hanno una forma detta "ad ossa di cane", per ovvi motivi: hanno due porzioni all'estremità con una sezione maggiore, restringendosi al centro del provino nel cosiddetto **Tratto utile** di sezione differente. La forma può essere **chudica** o **piatta**. Tutte le dimensioni dei provini sono regolamentate.

Le macchine in cui il provino viene inserito sono uguali per prove di Trazione e Compressione. Prevedono due bracci (uno fisso su cui s'aggancia il provino, l'altro mobile): attraverso la rotazione con cui il braccio mobile si muove si regola la variazione della forza. La prova dunque si basa sull'applicazione di una sollecitazione su una porzione del provino (tratto utile) su cui valutiamo la risposta elastica del materiale ed eventualmente plastica (momento elastico ridotto lungo direzioni e piani specifici). La componente della forza che su tali piani risulterà



Queste sono le curve σ - ϵ dello stesso materiale ceramico, con la curva di compressione e quella di trazione differenti. Tra loro, le due curve hanno lo stesso rendimento essendo E lo stesso in entrambi i casi: quel che cambia è la sollecitazione necessaria per far rompere il materiale, ossia il punto massimo della curva σ - ϵ prima che il materiale vada a rompersi.

Questa differenza non è dovuta a nulla che riguardi la sollecitazione in sé, in quanto dal punto di vista teorico ripensando la deformazione elastica non dovrebbe esserci differenza. Vedremo poi qual è il fattore determinante.

Nel caso di ceramici sottoposti a compressione la curva σ - ϵ raggiunge un massimo sopportabile, dopodiché avviene la rottura; tuttavia nella registrazione della curva la rottura di un materiale implica, poiché lo sforzo è a compressione, che continui ad esserci del materiale tra i bracci della macchina, il quale si sbriciola sotto l'effetto delle forze ma continuando ad opporre resistenza. Per questo motivo si registrano gli scatti sulla curva con la resistenza che diminuisce via via. Nel trattamento dei dati tale porzione di curva viene tagliata in quanto non fa riferimento al materiale integro.

La prima cosa da fare nel procedimento di una prova meccanica è misurare le dimensioni esatte del provino, quali: la lunghezza e lo spessore: queste rappresentano l'area che va a rispondere alla sollecitazione. Per la determinazione di σ - ϵ è utile anche avere la lunghezza l_0 cui andremo a riferire la variazione di lunghezza. Si rileva la lunghezza del tratto utile segnando le estremità in modo da misurare la lunghezza a seguito della deformazione.

Due ganasce del macchina bloccano le estremità del provino, senza apporre sollecitazioni. Si applica sul provino uno strumento detto **estensimetro**, in grado di misurare con un maggior livello di precisione la deformazione iniziale, ovvero quella **elastica**, la quale essendo molto ridotta va a richiedere una misura

basse, ed il materiale può deformarsi plasticamente. Nel reticolo ideale l'energia richiesta per lo scorrimento sarebbe di gran lunga maggiore.

Il movimento dislocativo continua portando, man mano che le varie porzioni di reticolo scorrono le une sulle altre, la sezione portante del materiale al **restri-**
guento. Si arriva a un'altra fase la strizione, in corrispondenza della quale la
curva σ - ϵ inizia a ridurre la pendenza, fino a quando il materiale giungerà
a rottura (fine della curva σ - ϵ).

Dalla prova a trazione possiamo dunque ottenere E (almeno indicativamente), σ_y ,
la **resistenza massima** (in questo caso resistenza a trazione, la quale indica la sollecitazione applicabile al materiale prima che giunga a rottura, prevedendo una
deformazione plastica).

Fino al valore di **resistenza a trazione** il materiale può deformarsi ancora
integro: quando si forma la strizione al centro del provino inizia a formarsi una
cricca. Questo è il punto fondamentale della progettazione perché la cricca indica un
materiale non più integro. La resistenza massima dunque non è la resistenza di
rottura, a cui poi effettivamente la curva si interrompe bensì quel punto massimo
della porzione in corrispondenza del quale si verifica la strizione.

L'ultima informazione importante è la misura della deformazione complessiva del ma-
teriale, ossia la deformazione che si legge in corrispondenza del punto ultimo.

La prima caratteristica meccanica, il **limite di snervamento**, lo identifichiamo nel
punto in cui la curva σ - ϵ si allontana dall'andamento lineare: σ_y (sforzo) è
il limite tra parte elastica e parte plastica. In alcuni casi alcuni metalli duran-
te la registrazione della curva σ - ϵ nella zona di passaggio tra tratto elastico
e tratto plastico **non hanno un'andamento netto come rappresentato nel grafico
di distacco dalla linearità**. In corrispondenza di tale passaggio si pos-
sano avere delle **oscillazioni** della curva. In questi casi, se il limite elastico è
il punto in cui ci si discosta dalla linearità, in presenza delle oscillazioni il pun-
to della sollecitazione che definiamo limite elastico si sceglie (convenzionalmen-
te) lo sforzo corrispondente allo 0,2% di deformazione. Nel caso in cui invece
il distacco sia chiaro il limite di snervamento è σ_y .

Nella regione plastica si deve tenere conto del fatto che il materiale subisce delle de-
formazioni plastiche, ma quel che più interessa è stabilire la sollecitazione
massima che il materiale riesce a sopportare ancora integro (resistenza a rot-
tura). Oltre tale limite si forma la strizione che corrisponde ad una deformatio-
ne: si può misurare anche la **strizione a rottura** semplicemente come

- Prove meccaniche di compressione -

In questo caso i provini con sono a "forma di osso di cane", basi possiedono forme cubiche o cilindriche con dimensioni specificate da normativa (una altezza almeno doppia rispetto al diametro per il cilindro). È fondamentale che i due basi abbiano le basi perfettamente piane e parallele, così che il campione possa subire lo sforzo nel modo corretto.

Secondo Poisson ci si aspetta di veder crescere le sezioni di appoggio a seguito della compressione. Le curve saranno circa le stesse ottenute per trazione, o per lo meno qualitativamente simili.

- Prove meccaniche di sollecitazione a flessione -

La macchina è parzialmente uguale a quella delle prove a trazione/compressione, cambiando ovviamente le interfacce con i campioni. La parte inferiore della macchina sarà fissa, mentre sarà mobile il braccio superiore.

Si hanno una cosiddette **prove di flessione a 3 punti**, in cui vi sono 2 punti per l'appoggio del provino ed uno centrale che applica la forza per indurre la flessione, ed una **prove di flessione a 4 punti**, con 2 punti per l'appoggio e 2 punti per l'applicazione della forza. In questo caso è necessario caratterizzare il campione nella condizione di flessione in quanto questa è una situazione mista di trazione e compressione che varia a seconda della posizione e dello spessore del campione spesso. Si utilizzano poi delle formule apposite per analizzare e misurare la resistenza a flessione.

Lezione n° 10

07/11/2016

- Prove meccanica a durezza -

Rispetto alle altre prove statiche presenta una differenza sostanziale: se nelle altre prove si applica una forza al campione fino a rottura, nel caso della durezza non registriamo mai la rottura del provino. **La durezza è una prova non distruttiva**, molto utile durante il ciclo produttivo dei componenti per verificare la qualità dei prodotti e la riproducibilità dei processi di produzione.

Addirittura un componente in fase di produzione può essere prelevato, testato a durezza e reinserito nella linea di produzione in quanto il test compie una semplice variazione superficiale che non influisce il comportamento del materiale.

4) **HR**: impronta sferica o conica; la particolarità della durezza Rockwell è l'applicazione di un precarico prima di applicare il carico definitivo. Svolgendo un test di durezza questo consiste nell'avvicinare il più possibile la punta dell'indentatore alla superficie senza però applicare alcuna forza. Dopo qualche (secondo i dettami di normative) si cessa con dei carichi stabiliti e si valuta in base alla penetrazione della punta l'impronta. Più il materiale sarà resistente, più la punta farà fatica a penetrare lasciando un'impronta più piccola. Il test di durezza serve quindi a dare una misurazione della resistenza del materiale.

Nella durezza Rockwell invece si avvicina la punta pre-caricando l'indentatore, così da indurre già un minimo di penetrazione, per poi applicare il carico nominale per arrivare alla definizione dell'impronta.

Cosa succede quando la punta cerca di penetrare nel materiale?

Dobbiamo immaginare microscopicamente che si sta applicando una sollecitazione in una zona molto ristretta del materiale rispetto alla possibile sezione di un provino: il materiale a contatto con la punta avrà prima una deformazione elastica, dopodiché avverrà la deformazione plastica. Proprio grazie alla deformazione plastica si ha la possibilità di osservare l'impronta.

È stato stabilito che il valore di durezza di un materiale corrisponde circa a 3 volte il suo limite di snervamento:

$$H \approx 3\sigma_y \text{ (limite elastico)}$$

Essendo H in stretta correlazione con una delle resistenze di cui si è parlato, si potrebbe immaginare che anch'essa venga misurata in MPa: non è così, poiché si utilizza generalmente l'unità di misura $\frac{kg}{mm^2}$. Per rispettare la proporzione e gli ordini di grandezza si ha quindi che

$$H \approx \frac{30y}{10} \approx \frac{\sigma_y}{3}$$

Il riferimento è alla durezza Vickers, ovvero la durezza maggiormente valutata ed utilizzata.

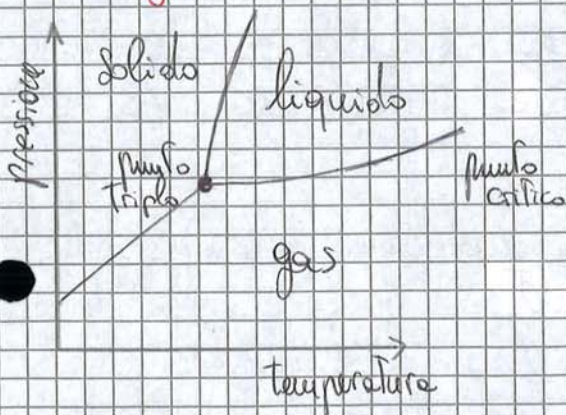
Ognuna delle prove che portano a misurare la durezza di un materiale ha una scala tutta sua: attraverso le formule viste si determinano i vari valori di durezza Vickers, Brinell, Rockwell, Knoop ma esiste una corrispondenza di retta tra le varie scale. Per confrontare due materiali di cui si conoscano le durezza secondo prove diverse si devono utilizzare le scale di slide 26 (72)

- I diagrammi di stato - *

Quando si ha un materiale puro si considera un reticolo in cui si ritrova sempre la stessa tipologia di atomo: tutto ciò è però utopistico. In realtà nel momento in cui si forma un solido è facilissimo (per via delle fasi di processo o in maniera volontaria) ottenere all'interno del reticolo varie tipologie di atomo. Si va dunque verso una situazione definita come **soluzione solida** (che poi può differenziarsi a seconda del posizionamento degli atomi): atomi "estranei" entrano nel reticolo della sostanza prevalente (solvente). Tutte le leggi sono in generale delle soluzioni solide.

Cosa succede quando si ha un elemento estraneo (o una seconda sostanza) che si trova nello stesso volume, dunque nello stesso materiale, del solvente? Al di là delle conseguenze locali che atomi sostituzionali/interstiziali possono portare localmente, c'è poi una differenza nel comportamento dei materiali? C'è una differenza in come questi vanno processati? Per capire come creare una soluzione solida dobbiamo approssimare i **diagrammi di stato**.

- Diagramma di stato di una sostanza pura -



Si ha una sostanza pura: gli atomi sono uguali fra loro. Tale sostanza assume differenti stati della materia a seconda delle condizioni a cui è sottoposta. Normalmente qualsiasi sostanza al variare di pressione e temperatura è in grado di trasformarsi passando da uno stato all'altro. Le condizioni di p

e T in cui avvengono tali trasformazioni sono dipendenti dalla sostanza. Solido, liquido e gas sono degli **stati fisici della materia**: una determinata fase (cioè una composizione chimica precisa) può trovarsi nei diversi stati fisici a seconda di pressione e temperatura.

Fase: uniformità di composizione chimica e di stato fisico.

Fissata una determinata composizione chimica si può decidere o modificare il suo stato fisico, modificando p e T. Nel momento in cui si deve definire un sistema all'equilibrio si segue una regola specifica, ossia la **regola delle fasi** (o **regola di Gibbs**)

In questo caso $V = 1 - 3 + 2 = 0$: la varianza è nulla: partendo dal punto Triplo sia cambiando p che cambiando T non si mantengono le 3 fasi contemporaneamente. Se si vuole mantenere il punto Triplo non si ha alcuna variabile da modificare. Si ha un solo valore di p che, abbinate ad un solo valore di T , permette la coesistenza dei tre stati.

- Diagrammi di stato: sostanze a 2 componenti -

Per semplicità ragioniamo su trasformazioni che avvengono a pressione atmosferica, variando solo T . In questo caso sarà $n=2$.

Vediamo come si evolve un sistema di questo tipo in una trasformazione di fase $L \rightarrow S$: sappiamo già, potendo modificare solo T , che $F=1$.

Ci preoccupiamo della trasformazione $L \rightarrow S$ perché nella maggior parte dei casi in cui si crea una lega il metodo più semplice è quello di fondere i materiali e poi sceberli. Una volta miscelati allo stato liquido, come solidificano? Ce lo dicono anticipatamente i diagrammi di stato, mostrando: quale sarà la situazione finale.

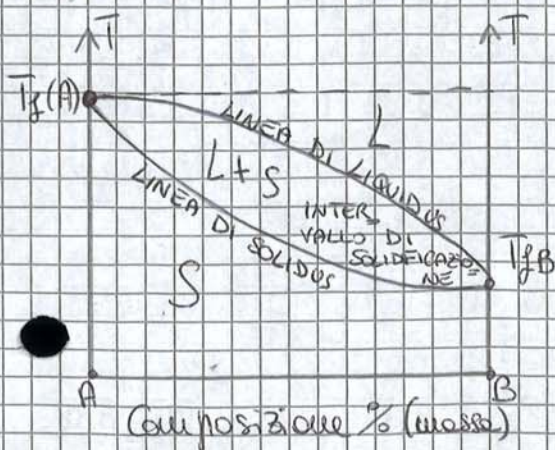
Considerati 2 componenti:

• Totalmente miscibili allo stato liquido

Il sistema può evolvere secondo 3 possibilità:

- Totale miscibilità allo stato liquido ed allo stato solido
- Totale miscibilità allo stato liquido e completa immiscibilità allo stato solido
- Totale miscibilità allo stato liquido e parziale miscibilità allo stato solido

- Miscibilità Totale allo stato L e S -



La miscibilità si mantiene anche allo stato solido.

Partiamo da una soluzione liquida del componente A e del componente B: la miscelazione allo stato liquido tra A e B è completa.

il sistema è tutto solido.

Nel caso di sistemi con più componenti questo non avviene: all'interno si hanno dei componenti che, per loro natura, tendono a comportarsi diversamente; tutto ciò essendo miscelati devono tenere conto anche dell'altro componente di natura e comportamento differente. Nel sistema a 2 componenti, la presenza di B modifica il comportamento di A e viceversa. Il raffreddamento è una solidificazione graduale, con un solido che non si forma ad un'unica temperatura bensì, man mano che T scende, solidifica in porzioni sempre maggiori.

Si raggiunge infine la temperatura alla quale l'ultima goccia di liquido solidifica, ottenendo un sistema completamente solidificato.

In un sistema a 2 componenti si distinguono due linee fondamentali: per qualsiasi percentuale dei 2 componenti. Tutti i punti che formano le due linee rappresentano le due temperature fondamentali. Tali curve sono dette **linee di liquidus** e **linee di solidus**.

Spostandosi lungo l'asse delle ascisse variano le percentuali di A e B presenti. Per ogni rapporto percentuale si può tracciare una linea parallela all'asse delle ordinate la quale indicherà una precisa composizione del sistema, con %A e %B. Percorrendo tale linea lungo temperature che vanno a calore, dall'alto verso il basso, si legge come tale sistema subisce la trasformazione da liquido a solido. Verranno indicate la linea di liquidus (indica, per una specifica composizione, quale temperatura al di sotto della quale inizia la solidificazione) e, chiamando a scendere, la linea di solidus (indica, per una specifica composizione, la temperatura al di sotto della quale il sistema sarà completamente solido). Ogni composizione A-B nel diagramma avrà questo profilo termico.

NB: il diagramma dice come la temperatura di liquidus e la temperatura di solidus variano costanti al variare della composizione. Più aumento fa percentuale del componente B (che per sua natura solidifica a T minori) più la temperatura di liquidus del sistema diminuirà.

Disegnato il diagramma di stato, il passo successivo è definire e descrivere il raffreddamento di un sistema specifico. Avendo una **composizione specifica**, questa sarà rappresentata come una linea tratteggiata con nome C_0 . A tale C_0 si studia poi l'evoluzione del sistema.

Entrati nelle regione di solidificazione, si iniziano a formare i primi grani solidi:



In questa situazione non conosciamo però la composizione dei grani, la quale sarà certamente diversa da C_0 . Stabiliamo quindi siano la composizione del liquido C_L e del solido C_S leggendo, per una data temperatura, incrociando le due curve.

Nell'intervallo di solidificazione, ad ogni temperatura si può tracciare una retta parallela all'asse delle ascisse: all'intersezione con la curva di liquidus si trova la composizione C_L (a T_1); all'intersezione con la curva di solidus si trova la composizione C_S (a T_1).

A T_1 , il sistema inizialmente a C_0 , si è parzialmente trasformato in solido con composizione C_S ; il resto del sistema, rimasto liquido, ha composizione C_L .

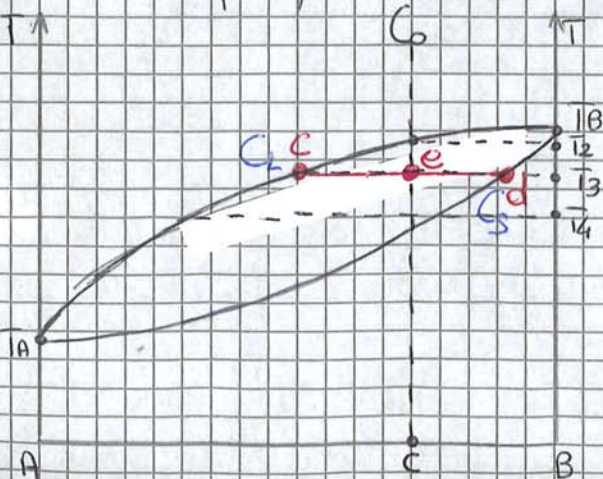
Si hanno 2 fasi a T_1 : liquido e solido; ma in entrambi i casi la fase sarà unica, in quanto i componenti sono completamente miscibili. Se quelle passano allo stato solido continueranno a poter essere completamente miscelati e rimangono un C_0 .

Continuando a raffreddare si scende sotto la curva di solidus, ottenendo un sistema completamente solido. I due sistemi sono completamente miscibili: si trova ad avere una composizione uguale a quella iniziale.

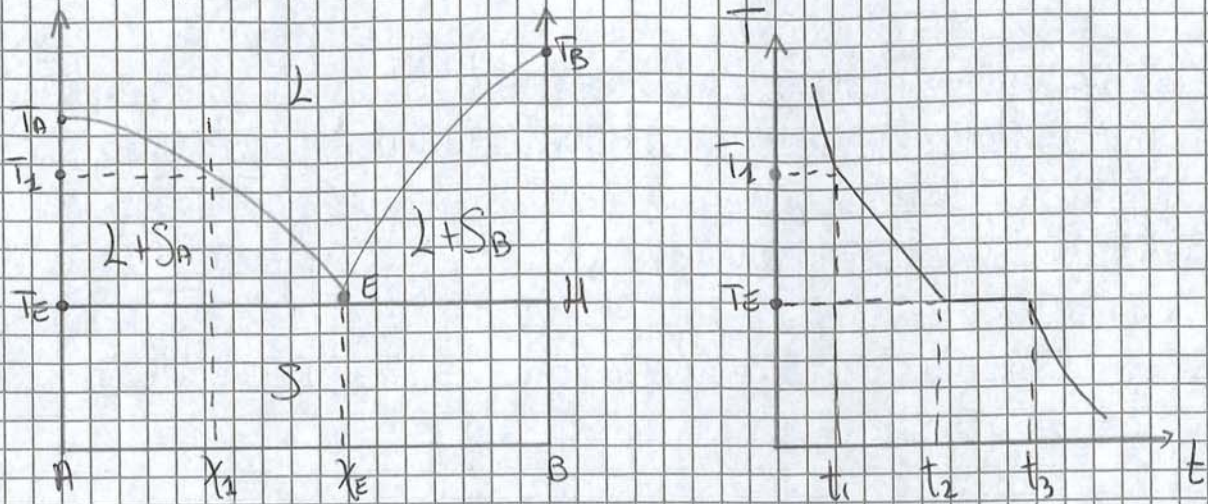


Al microscopio si ha un materiale policristallino di composizione C_0 , con A e B completamente miscibili tra loro a formare la soluzione solida.

Nell'intervallo di solidificazione si vede il sistema che va via via solidificandosi, ma non abbiamo dettagli sul processo. Come quantifichiamo la presenza dei due stati? Si può fare attraverso la **regola della leva**.



punto in cui avviene una trasformazione detta **trasformazione eutettica**. La trasformazione eutettica prevede la trasformazione di un liquido in due solidi con composizione di fase diverse.



Si parte da un liquido avente una composizione unica data da A+B che, in una determinata condizione, dà vita non ad un unico solido, bensì **in contemporanea a due solidi**: solido A puro e solido B puro.

La trasformazione eutettica avviene **solo se ci si trova nello specifico punto E**, dunque solo se il sistema ha un liquido che si trova alla composizione eutettica con una temperatura pari alla temperatura eutettica. L'eutettico è un unico punto, esattamente come il punto Triplo. **Queste due sono le condizioni necessarie per fare avvenire la trasformazione di un liquido in due solidi diversi.**

Si ha una fase allo stato liquido, mentre si hanno 2 fasi allo stato solido; fase "solido A puro" e fase "solido B puro". Nel punto eutettico si incontrano 3 fasi.

La varianza nell'eutettico è: $V = 2 - 3 + 1 = 0$, ossia per mantenere la composizione delle tre fasi non si può cambiare T. **La trasformazione eutettica avviene in condizioni isoterme.** Il sistema raffredda ed arriva in E, T rimane costante fin quando non c'è l'evoluzione nei due solidi.

Dal punto di vista microstrutturale il liquido che si trova alla composizione eutettica alla T_E tende a solidificare, ma essendo A e B immiscibili allo stato solido, solidificano formando delle **lamelle** di B puro alternate a **lamelle** di A puro.



Non essendo compatibili allo stato solido, gli atomi tendono a concentrarsi in lamelle di un ferale puro sfruttando la diffusione allo stato solido. Essendo un processo basato sulla diffusione allo stato solido non si può immaginare che tutti gli atomi

temperatura, per qualsiasi composizione, si conclude la solidificazione del sistema. Al di sotto della temperatura eutettica, per qualsiasi percentuale di A e di B, il sistema sarà completamente solido. Il solido avrà in questo caso 2 fasi solide distinte. Per questo motivo, avendo due solidi distinti, nelle 2 regioni bifasiche in cui coesistono una fase liquida o una fase solida si deve specificare quale composizione chimica abbia la fase solida: perché mentre il liquido ha sempre la stessa composizione, nel caso della fase solida se la regione bifasica è confinante con l'asse delle ordinate relativa al 100% A il solido che si forma sarà solido A. Se invece si tende verso la composizione 100% si avrà nella regione bifasica la coesistenza di una fase liquida con il solido B. Vediamo anche in questo caso come, abbassando la temperatura, il sistema evolve.

Partiamo da una temperatura sufficientemente alta da garantire di essere nella condizione di soluzione liquida, dove A e B sono perfettamente miscibili. La fase liquida avrà composizione C_0 .

Raffreddiamo il sistema fino a superare la curva di liquidus: entriamo in una regione bifasica in cui vediamo il liquido rimanente e dei granelli solidi della porzione di sistema che ha già iniziato la solidificazione. In questo caso però siamo nella regione L+SA o L+SB (dipende da C_0). Tutti i granelli formati avranno tutti una composizione specifica, ossia 100% A (o 100% B).

Ad una certa T_1 ($T_A(T_0) > T_1 > T_E$) si avrà un liquido la cui composizione si legge sulle curve di liquidus, mentre la composizione del solido si legge sul lato estremo (100% A o 100% B) della regione. Raffreddando, sono solo gli atomi di A (o di B) a diventare solidi.

Abbassando la temperatura sempre all'interno della regione L+S_x si vedrà come la quantità di fase liquida andrà via via diminuendo e la quantità di fase solida andrà via via aumentando. Riguardo alle composizioni, tutto il solido che si forma continuerà ad avere 100% A (o B), mentre per la fase liquida si ha un sistema in cui stiamo sottraendo atomi di A (o B): ciò significa che il numero di atomi di B (o A) rimane costante ma percentualmente aumenta. Il sistema si sposta via via verso percentuali maggiori di B (o A). Ovviamente la composizione del liquido si continua a leggere lungo la curva di liquidus.

Per questo motivo, una volta arrivati alla T_E si verifica la **trasposizione eutettica**.

Così succede al sistema alla temperatura eutettica?

alle fase solida in alcune condizioni i 2 componenti possono ed essere miscibili, in altre condizioni si separano nettamente. C'è un confine tra le due condizioni.

Partiamo con un'elevata concentrazione di A: nel caso delle poche avremo formazione di un reticolo di A con gli atomi di B che si inseriscono e formano la soluzione solida. In questo caso la soluzione solida può formarsi, ma solo se si rispettano alcune condizioni. Se le condizioni non vengono verificate e B non può andare a posizionarsi nel reticolo di A, allora gli atomi di B formano un nuovo reticolo.

Nell'altro sistema, in una condizione in cui prevalgono gli atomi di B ci saranno delle condizioni in cui gli atomi di A possono ed inserirsi nel reticolo degli atomi di B. Si forma una soluzione solida diversa da quella descritta nel primo caso. Chiamiamo le due soluzioni solide α e β .

In mezzo si ha una regione bifase con 2 fasi solide non di componenti puri, bensì sono le 2 soluzioni α e β che convivono tra di loro. Essendo immiscibili non c'è un solido con composizione unica.

Nella zona $\alpha + \beta$ si ha anche qui il punto eutettico, dunque la trasformazione eutettica. Da composizione eutettica alla T_E evolverà nella trasformazione per cui il liquido tenderà a formare due solidi diversi, i quali in questo caso non saranno puri: saranno soluzione solida α e soluzione solida β . Il solido è sempre lamellare, ma le lamelle saranno S.S. α e S.S. β . Strutturalmente non cambia nulla, cambia solo la composizione delle lamelle.

La costruzione del diagramma comincia sempre da T_{FA} e T_{FB} . Con T_E e T_E si fissa il punto eutettico. Questo, unito a T_{FA} e T_{FB} , ci dà le curve di liquidus. Al di sotto delle curve di liquidus si possono avere differenti condizioni, ossia: 1) unica fase α ; 2) unica fase β ; 3) coesistenza delle due fasi.

Se si parte da una concentrazione 100% A si ottiene la soluzione α sotto la curva di liquidus, e così si verifica aumentando la concentrazione di B fino ad un certo valore. Superato tale valore, gli atomi di B non entrano più nel reticolo di A e formano una loro struttura. Al valore limite si è superato il limite di solubilità della soluzione α .

Si noti che la struttura formata in seguito da B non rimane pura: atomi di A si inseriscono nel reticolo di B. In questo modo si forma β .

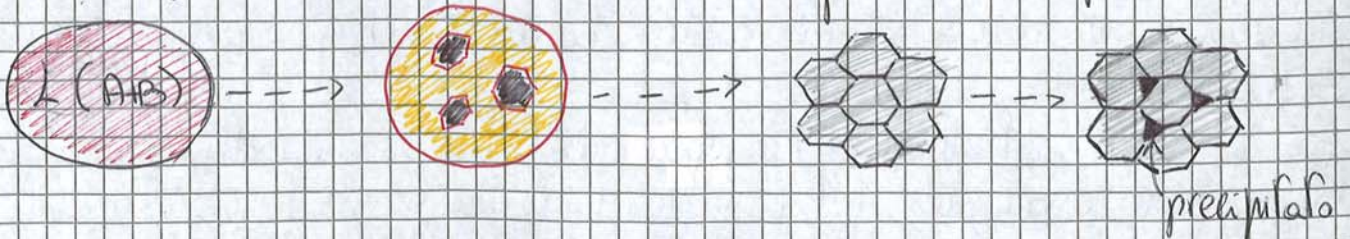
Ovviamente vale lo stesso ragionamento partendo da 100% B.

Per poter costruire il diagramma abbiamo quindi necessità di conoscere i limiti di solubilità: intanto sappiamo che la condizione limite al di sotto della quale il sistema è sempre tutto solido è la T_E . Serve quindi conoscere tali limiti alla T_E .

Quosciamo già come si debba valutare la zona $L + \text{Solido } \alpha$.

3) $C_0 = C_1$: il sistema dallo stato liquido incontra la regione bifasica $L + \alpha$; sotto la curva di liquidus C_{L1} si formano grani di solido α . Traccolando le curve di solidus, si giunge in una regione dove il sistema è completamente solido (con campo di fase iniziale $C_0 = C_1$). La fase sarà unica, avendo solo solido α . Il liquido è via via diminuito fino ad arrivare in una condizione in cui il sistema considerato subisce il completamento della solidificazione. Nel caso di C_1 il sistema rimane invariato fino a T_{inv} . Essendo già completamente solido per $T > T_E$, arrivati allo T_E non accade nulla.

4) $C_0 = C_3$ il sistema passa attraverso 2 regioni, incrociando anche le curve di solidus. Il tutto si evolve come per la composizione C_1 , distinguendosi però per una temperatura la quale una volta raggiunta porta all'incrocio con la curva di solidus. Superata tale curva ci sono atomi di B i quali non trovano più posto nel reticolo a causa dell'abbassamento di temperatura: tale calo porta ad una diminuzione della solubilità in quanto il reticolo vede molta meno agitazione particellare e le distanze interatomiche si riducono. Si riduce lo spazio per gli atomi estranei i quali vengono quindi espulsi. Si formano quindi le soluzioni solide β . Nel momento in cui si supera il limite di solubilità gli atomi di solido non possono più occupare posizioni aggiuntive di quel reticolo: **si formano i precipitati**. I precipitati si vanno a formare a bordo grano. I precipitati che si formano sono precipitati di β il quale, essendosi formato ad una temperatura inferiore rispetto alla temperatura in cui si è completata la solidificazione, viene chiamato **β secondario**. Si forma in un secondo momento, quindi per sottolineare il fatto che si sia formato tramite precipitazione lo si indica come β secondario. Entrati nella regione le curve di solidus ci danno le concentrazioni e le composizioni di L e β .



Riprendendo il caso C_2 , si noti che questo è l'unico in cui si incontra la linea di solidus parallela all'asse delle ascisse. Trovandoci nella regione $L + \alpha$, la composizione del liquido varia lungo la curva di liquidus, arrivando ad essere C_E a T_E , dunque nel punto E. Con la solidificazione completa si vanno a formare dei grani con lamelle: si ottiene una microstruttura con grani 100% α .

intermedio AuBn come la nuova ordinata: non ragioniamo con 100% A e 100% B, bensì spaccettiamo il diagramma di stato.

Otterremo un diagramma di un sistema completamente immiscibile allo stato solido. Non c'è alcuna differenza nel comportamento intermedio fra una situazione A-B oppure una situazione A-AuBn.

Esistono anche composti intermedi che non hanno una fusione congruente: in questo caso, partendo da una sostanza solida e riscaldando non si ha una trasformazione in un liquido; se invece la temperatura di fusione (incongruente) si forma un liquido con la coesistenza di un solido il quale ha una composizione diversa dal solido di partenza. Non è solo una fusione parziale: superata una data T il solido presente ha una composizione diversa da quella di partenza.

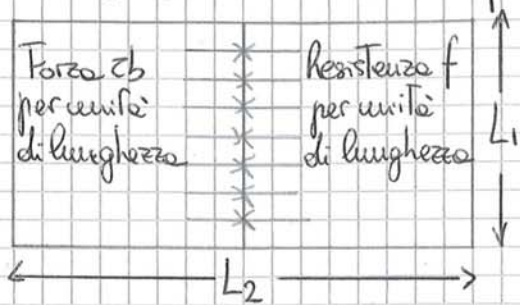
Solido 1 \leftrightarrow Solido 2 + liquido L

Mettiamo tale trasformazione a confronto con quella eutettica: sono entrambe trasformazioni che coinvolgono 3 fasi diverse tra loro. Vediamo che anche qui si tratta di una trasformazione invariante: come nell'eutettico applicando la regola di Gibbs si ottiene una varianza nulla. Non appena la temperatura cambia non vi sarà più la coesistenza delle 3 fasi. La trasformazione che avviene solo per il composto intermedio (ovunque ad una specifica composizione) si verifica ad una specifica temperatura. In questo caso si ha bisogno di un solido ad una determinata composizione ed ad una determinata T avviene la trasformazione peritettica. Se si ha un solido che si trasforma in 2 solidi (tutti i solidi coinvolti diversi tra loro) si ha la trasformazione eutettoidica. Anche la trasformazione eutettoidica avviene solo se il solido di partenza ha una determinata composizione e si trova ad una determinata temperatura.

Tutto ciò è importante in quanto rappresenta quanto avviene (nei punti salienti) nel diagramma di stato Fe-Fe₃C (cementite), ossia una porzione del diagramma di stato Fe-C. All'interno della regione Fe-Fe₃C, dove in base alla quantità di C si distingue tra acciai e ghise, si riconoscono 3 punti invarianti: nel punto viola si ha passaggio da liquido a solido 1 + solido 2: punto eutettico; nel punto giallo si ha passaggio da solido 1 a solido 2 + solido 3: punto eutettoidico; nel punto blu si ha passaggio da austenite a liquido + ferrite δ (solido 1 \rightarrow liquido + solido 2): punto peritettico.

Si usi la freccia in quei punti ad indicare che la trasformazione vale sia in riscaldamento che in raffreddamento.

to allo scorrimento dei piani nella direzione parallela al piano di scorrimento, in questo caso la dislocazione che interesserà tutta la lunghezza L_1 del piano si muoverà a muovere aiutando a percorrere la lunghezza L_2 .



Vista in pianta dall'alto del reticolo.

Se la forza d'attrito viene superata, il piano superiore del reticolo si sposterà fino al raggiungimento dello spostamento finale, indicato con il vettore \vec{b} .

Si ha all'interno del materiale uno sforzo esterno imposto, ossia una forza agente in rapporto all'area interessata. Nello specifico, tutta l'area interessata da tale sforzo di taglio è l'area $L_1 \cdot L_2$, che ricorriamo come area di scorrimento: dovendo ragionare in termini di forze possiamo estrarre da τ la forza F_s .

$$F_s = \tau L_1 L_2$$

La componente in termini di forza ci è utile per valutare il lavoro necessario per fare avvenire lo spostamento della parte superiore del cristallo rispetto a quella inferiore.

$$W = \tau L_1 L_2 b = F_s \cdot b$$

Ovviamente il lavoro è dato dal prodotto forza \times spostamento.

Abbiamo detto che quando la dislocazione si vuole muovere deve superare la resistenza f che vale per una lunghezza unitaria, ma nel moto dislocativo si muove tutto il segmento L_1 . Consideriamo quindi la resistenza del reticolo come prodotto della forza di attrito f per tutta la lunghezza interessata dallo spostamento: $f \cdot L_1$, che aiuterà a produrre uno spostamento L_2 . Di nuovo, il lavoro visto considerando una forza unitaria che agisce nel moto dislocativo secondo questo nuovo approccio sarà dato dal prodotto:

$$W = f L_1 \cdot L_2$$

Uguagliando i due lavori lo sforzo di taglio si opporrà alla forza resistente ma la dislocazione continuerà a rimanere ferma. La dislocazione riuscirà a muoversi solo quando la componente di lavoro che dipende dallo sforzo di taglio sarà maggiore di quella opposta dal reticolo.

Tutte le volte che $\tau > f/b$ si registrerà una deformazione reversibile. Ciò significa $\textcircled{32}$

solo una dislocazione che deve muoversi: all'interno di un reticolo l'unica forza che si oppone al suo movimento è la resistenza f . Tale f si modifica a seconda del reticolo considerato: ragionando su dei metalli puri, all'interno del reticolo si ha semplicemente degli atomi metallici che si legano tra loro attraverso dei legami metallici. Il legame metallico è in assoluto il legame migliore per favorire il moto dislocativo perché non avendo una direzione preferenziale lungo la quale si creano favorisce il meccanismo di rottura e formazione contemporanea di legami. Ciò conferma il fatto che i metalli puri sono in genere dei materiali molto teneri (facilmente deformabili), in quanto il reticolo ha una resistenza intrinseca molto bassa.

Ragionando sui materiali ceramici, avevamo già visto a livello di legami che nel caso del legame covalente, per la direzionalità, e nel caso del legame ionico, per l'attrazione/repulsione delle cariche, il moto dislocativo è impossibile. In termini di resistenza intrinseca del reticolo ciò si traduce in un'altissima f in opposizione allo scorrimento delle porzioni superiori rispetto a quella inferiore. Per questi materiali si ha la certezza che le dislocazioni non si muovono. Nel caso dei ceramici non dobbiamo preoccuparci di rafforzare il materiale in quanto già naturalmente raggiunge ottime resistenze. Nel caso dei ceramici il problema principale è il fatto che una volta superata f_{max} il materiale si romperà senza preavviso.

- Meccanismi di rafforzamento -

Parliamo dunque riferendoci ai soli materiali metallici. Partendo da un materiale per cui abbiamo un reticolo vicino all'idealità e agli atomi tutti della stessa natura, tale reticolo è molto propenso a fare scorrere le dislocazioni. Subire delle grandi deformazioni irreversibili che verranno ridotte da degli sforzi molto bassi. Tale caratteristica può essere positiva nel caso si voglia modificare la forma del materiale, mentre per altre applicazioni in cui la deformazione è indesiderata si tratta di una caratteristica problematica, che porta ad escludere i metalli puri da tali utilizzi. Per aumentare la resistenza si interviene con dei meccanismi di rafforzamento che si possono basare su 4 principi:

- 1) Rafforzamento per soluzione solida: passare da un metallo puro ad una sua lega, aggiungendo atomi di soluto.
- 2) Rafforzamento per precipitazione o dispersione: partendo dal metallo (94)

di fatto porta in più (dunque quel valore aggiuntivo di τ , $\Delta\tau$) sarà uguale al rapporto tra la forza di bloccaggio che il singolo difetto riesce ad apportare ed il numero di difetti per lo spostamento finale raggiunto:

$$\Delta\tau = P / (bL)$$

Dislocazioni e difetti cui portano variazioni nel reticolo, ma prima che avvenga il moto dislocativo tali variazioni possono essere annullate se opportunamente trattate. Sono quindi delle **variazioni elastiche**: gli atomi nell' intorno dei difetti si spostano dalla loro posizione ideale ma restano nell' intorno, non si spostano così tanto da quella che dovrebbe essere la loro posizione ideale. La deformazione diventa **irreversibile (plastica)** solo quando la dislocazione si è mossa a muovere. Anche solo un "passo" della dislocazione (non deve necessariamente arrivare al fondo del reticolo) è una variazione che il reticolo non riesce più a recuperare.

Sempre considerando il fattore di bloccaggio che ogni difetto può esercitare, si ha in realtà che per ogni ostacolo il bloccaggio **va ad aumentare di un fattore Eb^2** : tenendo conto di questo si ha che lo sforzo di taglio complessivo che dobbiamo applicare qualora si debba far muovere una dislocazione in presenza dei difetti assumerà la seguente forma:

$$\tau = \frac{\alpha E b^2}{L}$$

dove α è un coefficiente che tiene conto della resistenza specifica a scivolo del difetto considerato.

Tra linee di massima Tutti i meccanismi che vedremo andranno sempre a determinare uno sforzo aggiuntivo da applicare sul materiale per far muovere la dislocazione che dipenderà dal numero di difetti ostacolanti il moto dislocativo e dalla resistenza di ognuno di questi difetti. Al tempo stesso la dislocazione non avrà più la possibilità di percorrere tutta quella distanza L_2 che percorreva nel momento in cui non c'erano ostacoli. **La duttilità del materiale diminuirà in seguito a qualunque meccanismo di rafforzamento.**

- 1: rafforzamento a soluzione solida -

Inserendo nel reticolo un atomo di soluto, interstiziale o sostituzionale, perturberemo il reticolo nell' intorno del punto di inserimento. Seguiranno delle variazioni delle posizioni degli atomi subito attorno al difetto di tipo elastico. Poiché questo genere di difetti può interagire con la dislocazione, al loro inserimento si