



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2025A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Donati Francesca

MATERIA: Metallurgia (teoria + domande esame) - prof.
Scavino

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.

29/09/14

LEGA: materiale con caratteristiche metalliche

MATERIALI METALLICI: leghe, no elementi puri perché:

- costano;
- così migliorano le proprietà tecnologiche

Uno dei requisiti fondamentali dei materiali è la leggerezza

Per quanto riguarda i costi, questi dipendono dalla reperibilità:

1kg	}	acciaio	1€	→ lega di ferro + carbonio contenore di carbonio ≤ 2%	FERROLEGA
		alluminio	5€		
		titanio	100€		

GHISA: ferrolega contenore di carbonio > 2%

(il ferro non esiste → non dirlo nemmeno scovino si incazza)

chiamiamo ferro l'acciaio

In natura io non trovo i metalli, trovo minerali che possono essere convertiti in metalli.

Parlo di materiali:

- ideali: senza difetti
- reali: presentano (fortunatamente) dei difetti grazie ai quali sono utilizzabili

CARATTERISTICHE MATERIALI METALLICI

- Difetti {
 di punta
 di linea
 di superficie
 di volume

- Raggi X

- Diagramma di stato ferro-carbonio
 (diagramma di fase caratteristico che descrive lo stato di equilibrio delle leghe ferro-carbonio)

{
 - peritettico: solidificazione (produzione acciaio)
 - eutettico: reazioni sulle phase (punti nodali del diagram)
 - eutettoide: trattamenti termici

- Stabilità: esclusiva dei materiali metallici (unione delle proprietà di conduzione termica ed elettrica)



Energia aumentata da solido a gasoso

Energia aumentata da gasoso a solido

Ricorda che ad alte T la conducibilità elettrica diminuisce perché aumenta a basso T un sistema con molti difetti (che disturbano la conducibilità) diventa stabile.

Nei solidi ho una disposizione ordinata delle molecole, nei gas una disordinata.

3 parametri che definiscono un sistema sono

- ENERGIA
- TEMPERATURA
- ORDINE / DISORDINE

ENERGIA: potenzialità di un sistema di compiere lavoro

ENTALPIA: energia di un sistema (H)

In termodinamica il disordine, inteso come insieme di sistemi ordinati, è una caratteristica positiva perché può avere più combinazioni e possibilità di evoluzione (verso energie più basse) ed essere di conseguenza più stabile.

Posso definire una funzione di stato **G delta potenziale di Gibbs - Helmholtz** (energia di Gibbs - energia libera).

In generale (con T e p = costanti)

$$G = H + PV - TS$$

H/S/G: sono funzioni di stato perché caratteristiche del sistema

Nei casi in cui si ha una reazione finita, per il secondo principio, in assenza di scambi di lavoro ho:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Mediante l'analisi di G posso individuare se un sistema è in equilibrio o no. Se non sono all'equilibrio, G mi permette di stabilire in che "senso" si tende ad aver luogo la trasformazione.

- $\Delta G < 0$ avviene da sx a dx
 - $\Delta G > 0$ avviene da dx a sx
 - $\Delta G = 0$ equilibrio
- } Po equilibrio solo per valori minimi di G

15/10/14

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI METALLICI

- conduttività elettrica di tipo elettronico
- conduttività termica
- lucentezza
- proprietà magnetiche (dovute ad una particolare disposizione all'interno del materiale)
- deformabilità plastica (proprietà base dei materiali metallici)

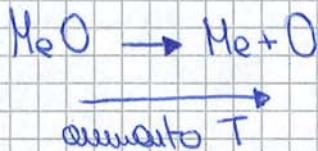
↓
importante perché:

- ① un pezzo costituito da materiale metallico può subire lavorazioni che altri materiali non possono,
- ② in opera nessuno è resistente a sollecitazioni variabili nel tempo (a causa della proprietà esclusiva dei mat metallici di assorbire energia durante la deformazione)
- ③ hanno basso costo di produzione

riducibilità

Definisco sidurgia la branca della tecnica che si occupa della produzione dei metalli.

Come detto all'inizio gli elementi si trovano combinati.

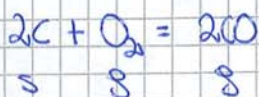


Partendo da un ossido metallico, all'aumentare della temperatura, questo si scompone. Aumentando quindi T sfavorevole la formazione dell'ossido (aspetto termodinamico), mentre se abbasso T la formazione dell'ossido è estremamente rapida (aspetto cinetico).

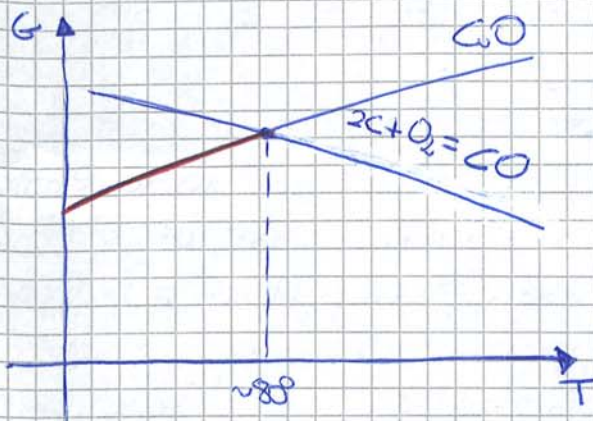


$G_{MeO} > G_{XO}$ → da un punto di vista termodinamico la reazione avviene se XO è più stabile di MeO (condizione iniziale necessaria)

Già sarà però una temperatura in cui il carbonio riesce a ridurre gli ossidi metallici.



22/11/14



La linea della CO è quella di riferimento per capire quali sono le temperature limite

L'elemento con energia di fusione maggiore è il rame e la T oltre la quale il monossido di carbonio può ridurre il rame è bassa (~800°C)

Ridurre vuol dire vuol dire ottenere un ossido metallico.

Per ottenere il rame puro (per l'industria) ho due metodi:

- Fusione per zone: partendo da una barra di rame, questa viene riscaldata da un splendido (per induzione). Viene scalfata una zona della barra che si fonde e quando viene riscaldata, la parte della sbarra che solidifica per ultima (partendo dal rame) è quella con maggiori impurezze e quindi quella da non utilizzare. Processo carbo.

• Elettrolisi

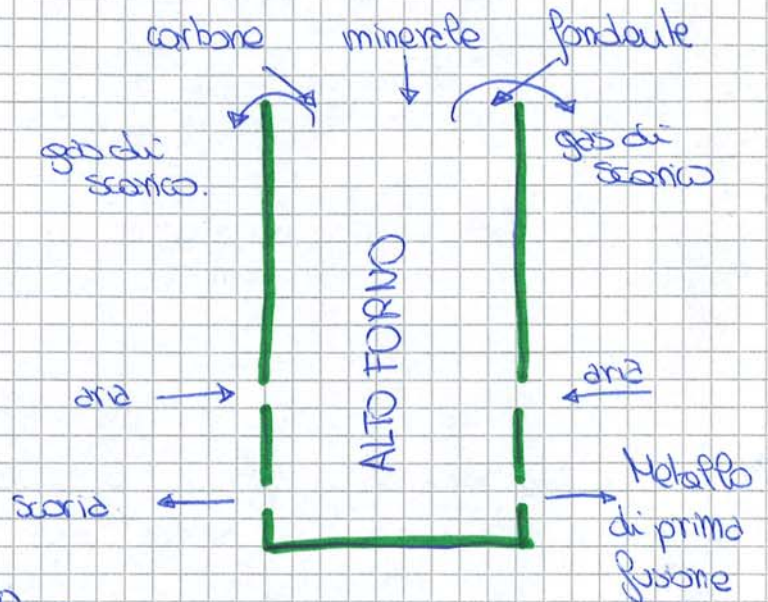
: partendo di esse inizio elettrolisi rompo i legami che questi fanno con l'ossigeno tramite l'ultravioletto di energia elettrica. Per far avanzare questo processo io devo partire da un metallo liquido. Per l'efficienza parto dall'ALUMINIA, allo fondente, e la unico allo crite che favorisce il processo. Estremamente costoso
 l'elettrolisi funziona anche nel caso del rame

Produzione acciaio liquido

Nei forni affollati (altiforni) vengono inseriti carbone ed altri con l'aiuto dell'energia calda proveniente e fondente. I prodotti di scarto sono scorie (silicati) e gas di scarto; le scorie vengono purificate nella produzione di cemento.

Il prodotto ottenuto, ovvero il metallo di prima fusione è la ghisa.

Per ottenere una tonnellata di ghisa deve utilizzare due tonnellate di minerale, 0,8 di carbone coke e circa 0,5 t di fondente (carbonato di calcio) e 4 t di aria.



INPUT

Minerale	2t
Coke	0,8t
CaCO ₃	0,4t
Aria	4t

OUTPUT

Ghisa	1t
Scorie	0,8t
Gas esusti	5,4t
Polvere	0,1t

GHISA DA ALTOFORNO

C (carbone) $3,5 \div 4\%$ (Fe_3C)

Mn (manganese) $0,4 \div 1,6\%$

Si (silicio) $0,6 \div 1,5\%$

Ottengo anche dello zolfo da queste trasformazioni ed elimino tramite il sodio così da favorire la formazione di zolfo di sodio che galleggia (è poco quindi nuotatore facoltuale). Il refettorio basico spalmato sulle pareti del convertitore) preferisce una scoria basica così da eliminare il fosforo (dannoso).

I convertitori con refettorio basico sono dei reattori dove in meno la ghisa liquida e poi ossigeno puro. A questo punto faccio una forte ossidazione (non in aggiunta l'inserimento di CaO) con varie reazioni tutte esotermiche; con l'aumentare di T favorisco la fusione dei rottami di ferro mantenendo la scoria fusa. Stoppo il processo quando inizia l'ossidazione del Fe, cominciando ad avere una piccola presenza di ossigeno. A questo punto devo effettuare il ALUMINAGGIO (ovvero eliminare l'ossigeno aggiungendo alluminio). L'alluminio si lega meglio all'ossigeno del ferro e si forma l'ossido di alluminio. Questo ossido è leggero, va in superficie e viene rimosso.

Questo ossido di alluminio ottenuto è detto acciaio ossidato. L'acciaio ossidato viene colato (in modo continuo) in vasche dove poi il liquido esce dentro guide in rame fortemente raffreddate in modo da formare una pellicola di solido. Quando si forma questa pellicola inizio a ramificare ovvero faccio passare il materiale dentro dai cilindri di così da poter strisciare e allungare. La ramifica che esce, chiamata bramma ha già subito la ramificazione primaria. Via poi passata alla ramificazione a caldo e alla fine di queste effettuo il DECAPPAGGIO ovvero immergo il materiale in una vasca piena di acido (cloridrico o solforico) che reagisce ed elimina l'ossido in superficie.

Poi l'ho (ramificazione a freddo e poi a Tambiatale) e ottengo un materiale incoerente (materiale interno vuole molto tensionato); a questo punto lo riscaldo (così da de-tensionare) e poi lo effettuo e passato a freddo; a questo punto devo proteggere la superficie con un costrutto di zincatura, lo faccio solidificare, lo riscaldo e lo mando in produzione.

Per evitare la corrosione vengono quindi utilizzate delle lamine zincate, poiché i materiali nobili fanno costi troppo elevati.

Un terzo modo di ridurre le perdite è l'uso di materiali a bassa resistività elettrica (oltre al rame o materiali nobili / leghe zincate) è l'alluminio

Questo permette di trasportare enormi quantità di energia elettrica e per limitare le perdite per effetto joule (calore dovuto alla resistenza)

Analizzandolo tramite formule

$P=VI$ $I \rightarrow 0$ e $V \uparrow \rightarrow$ per trasportare la corrente al meglio (evitando l'effetto joule)

possiamo scrivere le perdite come $P=RI^2$ dove R può essere definita come

$R = \rho \frac{l}{S}$ ρ - resistività (dipende dal materiale)

Per diminuire le perdite deve utilizzare fili con sezione molto grande (e quindi ρ piccola)

Dal punto di vista della convenienza se ho bisogno di conduttori a sezione grande conviene utilizzare il rame. Mentre dal punto di vista del peso è meglio utilizzare l'alluminio (se ho conduttori pesanti)

La resistività oltre ad dipendere dal materiale dipende anche dalla temperatura la quale è un fattore molto importante nella conducibilità. ($\rho \propto T$)

Al aumentando T aumenta ρ ovvero aumenta R e di conseguenza le perdite (perché il circuito si scotta)

Perché ρ è proporzionale a T ?



questi ioni creano un campo energetico in cui gli e^- possono transitare (non da condurre corrente).

Per perturbare questo movimento posso fare due cose: aggiungere ioni o creare delle "vacanze" (mancanza di un atomo).
 non ho un livello energetico \rightarrow ostacolo la corrente

Per capire se c'è già presenza di vacanze devo utilizzare misure di tipo elettrico, misurando per esempio la resistività del conduttore poiché queste aumentano all'aumentare delle vacanze.

Dal momento che le vacanze aumentano all'aumentare di T allora

Per un gas di ioni per occupare questo stato libero di rottura amov. delle vibrazioni termiche, le quali aumentano all'aumentare di T.

Condizione di equilibrio delle vacanze:

n_0 = numero atomi

n_v = numero posizioni vacanti

W_v = lavoro richiesto per formare una vacanza

$n_0 n_v$ = incremento energia interna (H=entalpia) dovuto alle vacanze.

Aumenta anche l'entropia poiché la presenza di vacanze crea:

- maggiore disordine
 - vibrazioni termiche più disordinate
- } entropia intrinseca

Aumenta maggiormente la cosiddetta entropia di miscela S_{mix}

Questa entropia mi dà la probabilità che un sistema perfetto + vuoto tenda ad un sistema con vacanze:

$$S_{mix} = - (n_0 + n_v) k \left[\frac{n_0}{n_0 + n_v} \ln \frac{n_0}{n_0 + n_v} + \frac{n_v}{n_0 + n_v} \ln \frac{n_v}{n_0 + n_v} \right]$$

con k = costante di Boltzmann (gas perfetti)

Espressione di S_{mix} semplificata è:

$$S_{mix} = +k \left[(n_0 + n_v) \ln (n_0 + n_v) - n_v \ln n_v - n_0 \ln n_0 \right]$$

Espressione di energia libera delle vacanze (incluse entropia ed entalpia):

$$G_v = n_v W_v - T S_{mix} \quad (\text{trascurando l'entropia intrinseca})$$

ossia

$$G_v = n_v W_v - T k \left[(n_0 + n_v) \ln (n_0 + n_v) - n_v \ln n_v - n_0 \ln n_0 \right]$$

Il numero delle vacanze sarà quello che mi dà energia minimo (G_v).

Condizione di equilibrio delle vacanze

$$\frac{dG_v}{dn_v} = 0$$

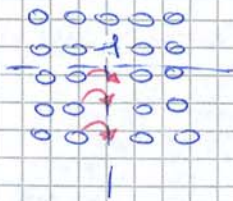
significa $W_v + T k \ln \frac{n_v}{n_0 + n_v} = 0$

poiché $n_v \ll n_0$ si ha

$$\frac{n_v}{n_0} = e^{-\frac{W_v}{kT}}$$

Importanza delle vacanze

Queste permettono - climb di dislocazioni (arrampicarsi) così da abbattere il piano di scorrimento



La vacanza +

dopo che tutti gli atomi sono "sotto" il piano "scivola" oltre la vacanza

Le tenute metalliche si deformano più a caldo che a freddo a causa dell'aumento di vacanze

- fenomeni diffusivi:

maggiore sono le vacanze maggiore è la diffusione. solo parte possono entrare più atomi esterni

Energia di formazione W_f dei difetti di punto nel rame (Cu)

- vacanze : 0.85
- divacanze : 1.40
- autointerstiziale : 3.50
- dislocazioni : 10^4 ev. cm^{-1}

Concentrazione dei diversi tipi di difetti nel Cu

	300 K	1350 K
vacanze	10^{-15}	10^{-3}
divacanze	10^{-20}	10^{-5}
autointerstiziale	10^{-65}	10^{-15}

- Misure difetti :
- dimensionali (allungamenti)
 - termodinamiche ($\Delta H, \Delta G_p$)
 - elettriche (p)
 - microscopio elettronico

Scambiatori di calore

I materiali utilizzati negli scambiatori di calore (termosifini) sono pensati come ghisa, acciaio, alluminio e ferro con una braspaghiata.

I termosifini in ghisa si hanno tutte con vecchie. riscaldamento e raffreddamento } fatti

Da lì bisogna di un riscaldamento rapido avere una buona conduttività termica; l'acciaio è il materiale più utilizzato perché sta a lungo ha ghisa ed alluminio α \rightarrow bassa inerzia termica.

Saldabilità

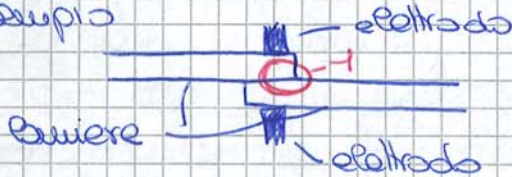
Ha presenza contemporaneamente di proprietà elettriche e termiche.

Porto a fusione diverse parti da collegare che raffreddamento dovuto conti vite allungando. \rightarrow saldatura.

Quando fonde solo il materiale da apporre \rightarrow bracciatore; parte di saldatore sabro quando fonde solo uno delle due parti (esempio: rame/alluminio).

Saldare vuol dire fondere calore per arrivare a fusione: ci sono vari metodi di di apporre di calore: contatto (riscaldamento diretto), arco elettrico o semplicemente sfruttando l'effetto joule.

Esempio



passi corrente tra le due barre sovrapposte e in un certo riscaldamento

Altri metodi di riscaldamento sono laser e corrente elettronica.

Riscaldamento per resistenza (effetto joule)

Sintesi tra proprietà elettriche e termiche.

Il ferro fonde a 1534°C, l'acciaio a 1400°C circa, l'alluminio fonde a 654°C.

La temperatura di fusione dell'alluminio è bassa e rappresenta il costo termico al quale deve arrivare per rompere i legami; per raggiungere questa T° deve fornire molta più energia perché ha alta conduttività termica, in fatti molto del calore fornito viene dissipato.

Definisco ZTA (HAZ): la zona termicamente alterata, zona che non state riscaldabile senza arrivare a fusione (hanno subito una tempo)*

Per l'alluminio se vedo oltre 100°C perde le proprietà meccaniche.



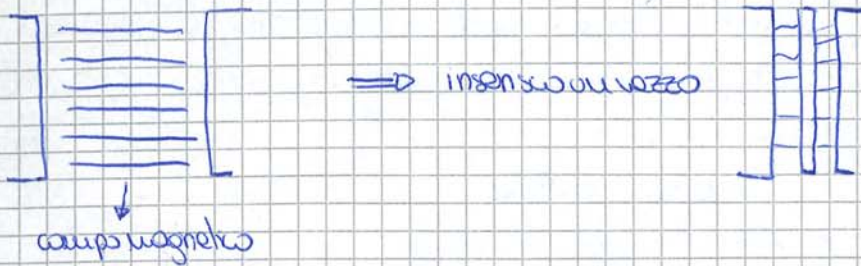
* subiscono una temp senza rimeamento \rightarrow sono zone fragili

(19)

Proprietà magnetiche

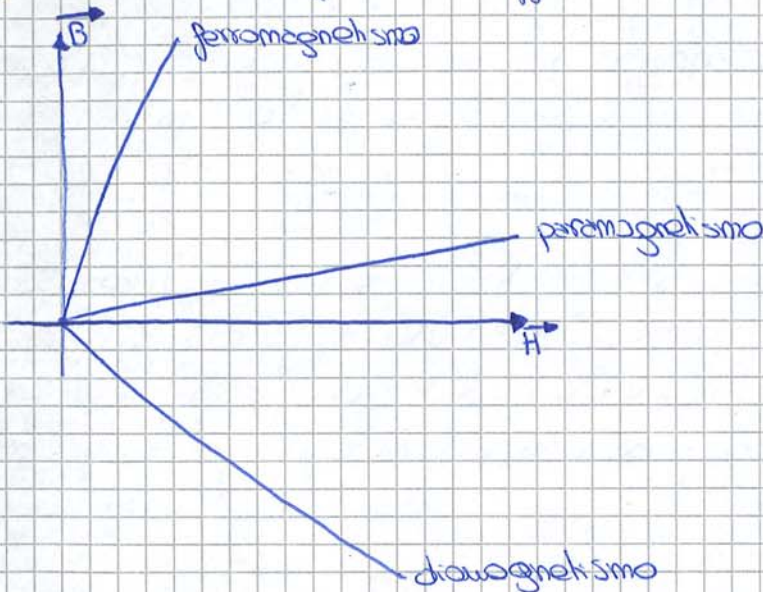
12/11/14

I materiali possiedono proprietà magnetiche se interagiscono con un campo magnetico; queste proprietà vanno paragonate dal legame atomico.



Con un mezzo passano due fenomeni:

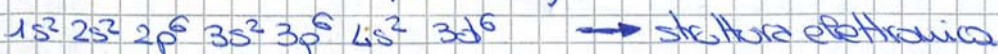
- ① Le linee del campo B sono repulse → materiali diamagnetico
- ② Le linee del campo B sono rafforzate → materiali ferromagnetico



H = intensità di B

Il diamagnetismo è un comportamento molto comune a quasi tutti i materiali. Gli elettroni del materiale vengono perturbati nel loro moto dal campo magnetico esterno al quale si oppone il campo magnetico creato dal loro stesso moto degli elettroni.

Il ferromagnetismo comportamento tipico del ferro e dei suoi composti (acciaio) Fe → 26° elemento (ha 26 e⁻)



Il ferro ha 6 e⁻ nel d quindi ha 4 orbitali occupati ovvero spaiati. Quando si formano dei composti questi orbitali rimangono spaiati, non ibridati dal punto di vista elettronico ed essendo 6 e⁻ la carica elementare in questo caso vengono a formarsi quattro momenti magnetici elementari i cui effetti si sovrappongono/ elidono così da ottenere nella situazione finale 2.6 momenti elementari. Gli elettroni di legame sono i $4s^2$, della banda di conduzione dove gli elettroni. ②

Problemi di saturazione



evito saturazione (grazie a Best) ed elimino Best.

Si formano 2 fenomeni:

① ritorno alle cond iniziali (reversibile) di smagnetizzazione completamente:

materiali magneticamente dolci ELETTROCALAMITA

② non ritorno alle condizioni

iniziali: materiali magneticamente duri (permanenti)

Il massimo di energia nei due domini non orientati, aumentando B (aumentando energia) B tutti i domini orientati, può quindi dire che B_0 massimo ordine con alta energia. Eliminando B , diventa l'energia di orientamento intorno allo stato iniziale (più stabile ma più disordinato).

Nel caso in cui non riesce a tornare alle condizioni iniziali, cioè un momento magnetico residuo che persiste anche dopo che la presenza di un contro-campo \rightarrow **ISTERESI MAGNETICA**

I materiali magneticamente dolci si smagnetizzano velocemente ma si smagnetizzano altrettanto velocemente, solitamente formati quasi da ferro puro, senza presenza di altri elementi.

Gli acciai contengono del carbonio che si posiziona negli interstizi essendo molto piccolo; se voglio ottenere MM dolci devo utilizzare il silicio che ha la proprietà di spingere il carbonio fuori dal reticolo (ottenuto grafiticamente)

Deformabilità plastica

I sistemi metallici possono deformarsi plasticamente sotto sforzo; (altrimenti lo sforzo \rightarrow ritorno al punto di partenza (DEFORMAZIONE ELASTICA)). Se eccedo il limite di deformazione elastica il materiale si rompe.

Caratteristiche di questa rottura sono velocità, (si propaga velocemente) bassa energia richiesta e B_0 non prevedibilità.



Ho per reticoli derivati ovvero dalle varianti dei reticoli primitivi, dove il più importante nei materiali metallici è quello cubico.

Esistono tre tipi di reticolo cubico: • reticolo cubico semplice

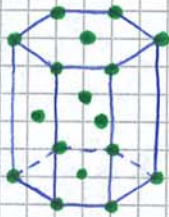
RETICOLI DERIVATI { • reticolo cubico corpo centrato
• reticolo cubico faccia centrato

Il ferro presenta due configurazioni:

cubico corpo centrato fino a 912°C e poi cubico a faccia centrato fino a 1400°C. Da 1400°C alla temperatura di fusione è di nuovo cubico a corpo centrato.

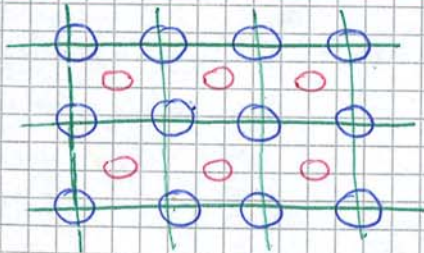
l'alluminio presenta solo la configurazione cubica a faccia centrata, il rame quella a corpo centrato, il nichel quella a faccia centrata (come oro, manganese e rame)

Un altro reticolo importante nei materiali metallici è quello esagonale compatto:

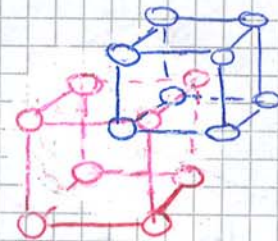


configurazione di zinco e titanio (al centro ho 3 atomi distanziati di 120°)

reticolo cubico semplice o meglio quadrato

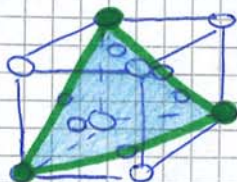


in 3D
inserisco un
altro cubo e
otengo →



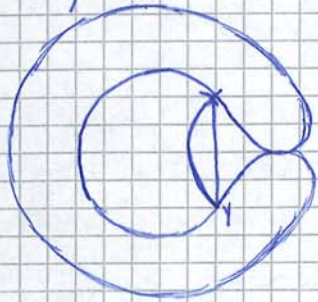
cubico a faccia centrato

per costruirlo devo utilizzare i piani esagonali (quelli che intercettano 3 vertici)



questo reticolo è molto più simile all'esagonale compatto che a quello a corpo centrato e può trasformarsi in quello esagonale.

Ipotesi una dislocazione in movimento su un piano di scorrimento da un'eventuale incontro con altre dislocazioni in movimento; la dislocazione si libera ma la forza che permette il movimento è nulla (è opprimente ed è un pezzo di legno) e fa "incrinare" la dislocazione fino a che questa non si richiude su se stessa, nonostante si richiuda su se stessa, l'eventuale della sua "trasformazione" modifica la struttura degli atomi ed i contatti che rimangono modificati nonostante la dislocazione quasi spariva (inclinandosi).



→ Frank-Read

Quando la dislocazione si muove, sono coinvolti gli atomi, e deve sapere in un qualche modo e grado di forza del tipo di dislocazione.

- Dislocazione a vite.
- Dislocazione a spigolo.

Dislocazione a vite

Il piano di Burger è perpendicolare alla dislocazione stessa ed è un piano lungo tutti i piani che contengono la dislocazione stessa e il suo vettore.

Se il piano presenta un ostacolo la dislocazione cambia piano spostandosi su un piano II ed precedente. Tutto questo perché i piani sono piani di scorrimento (è un maggior impaccamento atomico).

Dislocazione a spigolo

Il vettore di Burger è \perp alla dislocazione e giace sul piano di scorrimento, quindi ha un suo piano che contiene sia la dislocazione sia il vettore.

Posso cambiare il piano di scorrimento solo nel caso in cui la dislocazione incontri una vacanza. Il meccanismo per sapere questa vacanza è fornito dagli sforzi di compressione per "alzare" di piano, ed da quelli di trazione per "scendere" di piano.

La dislocazione a vite mi permette di abbandonare il piano sempre, mentre quella a spigolo non lo permette se non incontro una vacanza.

22. Aumentando T permetto un maggior movimento o un aumento di vacanze. HO PIÙ POSSIBILITÀ DI ABBANDONARE IL PIANO DI SCORRIMENTO.

20. Aumentare T favorisce una deformazione plastica per maggior mobilità delle dislocazioni.

Se ho una bassa energia dei difetti di riarrangiamento le due dislocazioni si possono allontanare di molto ed è quindi difficile che si ricompangano.

Questo è importante perché finché non si ricompangano tutte le dislocazioni "madre" non possono cambiare piano di scorrimento.

All'aumentare della elevata energia le dislocazioni si ricompangano più facilmente.

Nei casi ideali il carico di smarrimento è quello in cui la curva cambia pendenza ($R_{0.2}$)

↓
valore ottenuto come la pendenza della tangente all'origine spostata di 0.2



$$E_{acciaio} = 210 \text{ GPa}$$

$$E_{Al} = 70 \text{ GPa}$$

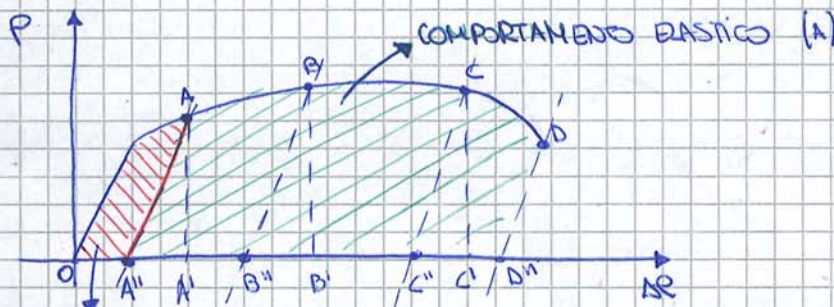


Diagramma carico-allungamento

comportamento plastico (A)

per B $OB'B'' \rightarrow$ elastico

$OB'B' \rightarrow$ ~~plastico~~ energia da fornire per def.

$OB''B'' \rightarrow$ elastico

Per passare dal punto A al punto B del materiale sia la componente elastica, sia quella plastica.

Ritorno elastico: quando eliminiamo la sollecitazione esterna il materiale torna ad avere comportamento elastico.

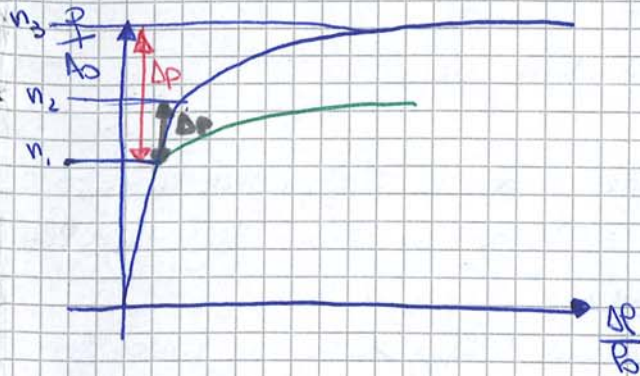
C'è il punto massimo dopo il quale il materiale ha una deformazione localizzata e la curva scade per strizione.

A seconda dell'area sotto della propria curva i materiali possono essere:
tenui \rightarrow elevata area con necessità di molta energia per rompere il materiale

fragili \rightarrow area sotto piccola con poca energia richiesta per far arrivare la rottura

toro negativo); oltre all'energia deve stare anche il fatto di intorbidarsi (altro fattore negativo). Sopportando questi fattori perché non potrà arrivare ad ottenere una deformazione plastica.

I valori di n accettabili sono compresi tra 0 e 1



A parità di deformazione ogni materiale presenta un Δp in cui è possibile lavorare (compresi nei valori di n); questo Δp può essere più o meno esteso e secondo delle peculiarità delle curve.

Nelle condizioni di carico massimo:

$$P = \sigma \cdot A \rightarrow dP = 0 \text{ ovvero } \sigma dA + A d\sigma = 0$$

quindi $\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A}$

Per costanza di volume $AP = \text{cost} \rightarrow d(AP) = 0$

$$A dP + P dA = 0 \rightarrow -\frac{dA}{A} = \frac{dP}{P} = d\varepsilon$$

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon$$

quindi

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$$



condizione di carico massimo P_{max}

lo so che $\sigma_0 = K \varepsilon^n$

che vedo a sostituire nella condizione di P_{max} :

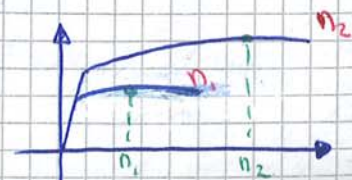
$$n K \varepsilon^{n-1} = K \varepsilon^n$$

quindi in condizioni di P_{max}

$$\varepsilon = n$$

Quindi quando n è elevato la curva è ripida (condizioni di carico maggiori) e allungamenti maggiori

A parità di deformazioni posso rappresentare la cosa graficamente:



(31)

La rottura dipende da: (deformando triassialmente):

- Tipo di materiale
- Tipo di sollecitazione
- Temperatura
- Varietà di applicazioni del carico e viceversa

e viene distinta in:

- fattura duttile (con deformazione plastica)
- fattura fragile
 - intergranulare (scollamento grani)
 - intra granulare: sfaldatura di oggetto

Fattura duttile

Fattura duttile su materiali

• monocristalli: si attiva un solo scivolo in una sola direzione senza incrudimento: esempio ad alta temperatura su materiali con reticolo esagonale perfetto
 prossimi \rightarrow fattura plastica su un piano inclinato di circa $\sim 45^\circ$



Per i monocristalli c'è la possibilità di scivolare più piani di scivolo; si osserva strizione con frattura a spigolo vivo.

Fattura duttile su materiali policristallini

Questi sono ammessi alla comparsa della strizione; questa inizia al centro della regione deformata in un piano che è macroscopicamente perpendicolare all'asse del carico applicato. La regione termina ai bordi del campione lungo una superficie inclinata di circa 40° rispetto all'asse del carico.



① centro del campione, ovvero inizio della zona striziata: si formano delle cavità probabilmente nucleate in prossimità di inclusioni.

Nucleazione: l'energia potenziale elastica associata alle deformazioni che circondano l'inclusione deve uguagliare l'energia libera della nuova superficie.

Posso dimostrare che:

- la deformazione critica per la nucleazione di una cavità vale

$$\epsilon = \left(\frac{\gamma}{4GR} \right)^{\frac{1}{2}}$$

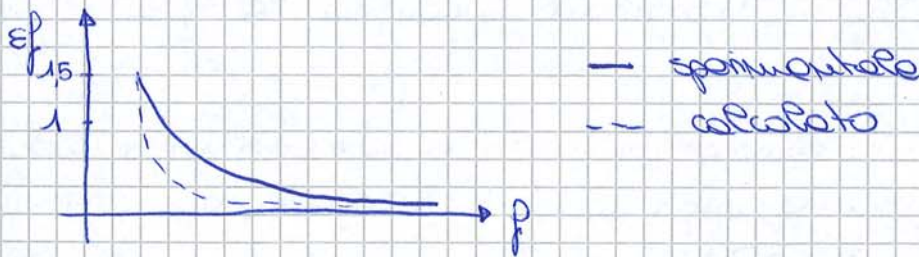
R = raggio particella
 γ = energia superficiale

- la tensione critica per la nucleazione di una cavità

vale $\sigma = \epsilon + (cG\gamma)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{f}{R} \right)^{\frac{1}{2}}$ dove σ e c sono costanti e f è la frazione volumetrica

osserva: l'allungamento a rottura ϵ_f dipende dalla frazione volumetrica f delle particelle ma non dal loro raggio.

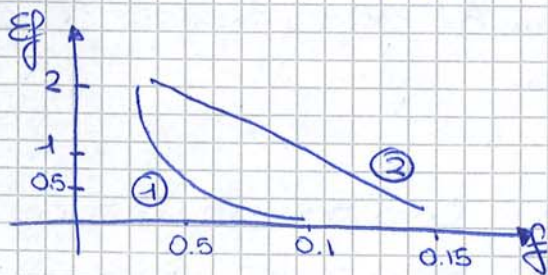
$$\epsilon \frac{e\gamma/k}{(3e - 2)} = \left(\frac{2}{3\pi} \right)^{\frac{1}{3}} k f^{-\frac{1}{2}}$$



Influenza di variabili nucleologiche sulla duttilità

Particelle

- frazione volumetrica totale di particelle di seconde fasi
- natura delle particelle: legole più o meno fortemente alla matrice e quindi più o meno propense a nucleare cavità



- ① sferri + ossidi + cementite
 l'ammortore
- ② carboni globulari legati alla matrice più fortemente delle inclusioni e delle cementite
 le l'ammortore

Quindi introduco il manganese. $Manganese + Zolfo =$ Solfuro di manganese se con $T_{est} = 1200^{\circ}C$ ovvero mi permette di lavorare l'acciaio a temperature più alte.

Acciai austenitici o a tenacità migliorata \rightarrow zolfo 0.1%
 \rightarrow manganese 1.5%

Prima si usava il Piombo per non si è più usato perché il Pb cadeva a fondo mentre l'acciaio rimaneva sopra.

Quindi lo zolfo indolisce il tracciato mentre il manganese per alzare la T_{est} .

Fessure fragili

Fenomeni di sfaldatura (divaggio) \rightarrow Tensionabilità

• Un materiale con strutture esagonali o c.c.c può essere facilmente spezzato facendo perire, a temperature molto basse e con poco assorbimento di energia, un cuneo lungo un piano assiale [(0001) o (100)]
 Tale operazione è chiamata sfaldatura o divaggio e non è osservabile nei materiali a reticolo c.f.c.

Carico teorico di frattura

La frattura comporta:

- rottura dei legami
- creazione di nuove superfici

e l'energia necessaria deriva dall'energia di deformazione elastica.

Si può dimostrare che $\sigma_T = \sqrt{\frac{2E\gamma}{a}}$

γ = energia superficiale

E = modulo di Young

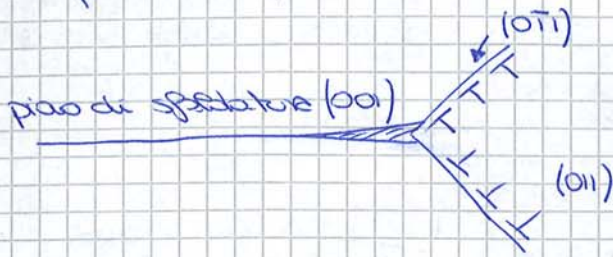
a = distanza interatomica media attraverso il piano di frattura quando il carico è zero.

Es. $E = 100000 \text{ MPa}$ $\gamma = 100 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2}$ $a = 3\text{\AA}$

$\sigma_T = 18000 \text{ MPa}$ valore elasticissimo } differente da quello sperimentale

sperimentalmente $\sigma = 1850$ per Fe al $\sigma_{max} \approx 280 \text{ MPa}$

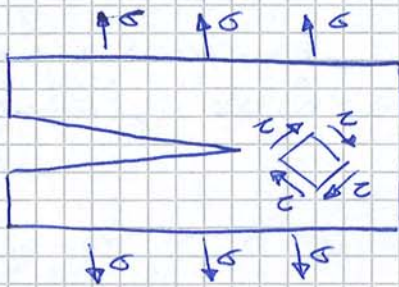
Es. 2 stabilimento contemporaneo di dislocazioni che si trovano sui piani di scorrimento che si intersecano



Durante la propagazione della fessura

$$E_{deformazione} \rightarrow E_{sprag} + E_{mot} + E_{deform. plastica}$$

Edoform plastica dipende dal fatto che davanti alla fessura si ha fortissima tensione e tensione localmente compatibile in conchi di taglio su piani a 45°. 😊



I conchi di taglio muovono dislocazioni sui piani di scorrimento preferenzialmente orientati

La mobilità è ridotta e quindi il termine di deformazione plastica non è molto essere poco influente se:

- Temperatura bassa.
- Velocità di incremento del fattore di carico elevato.

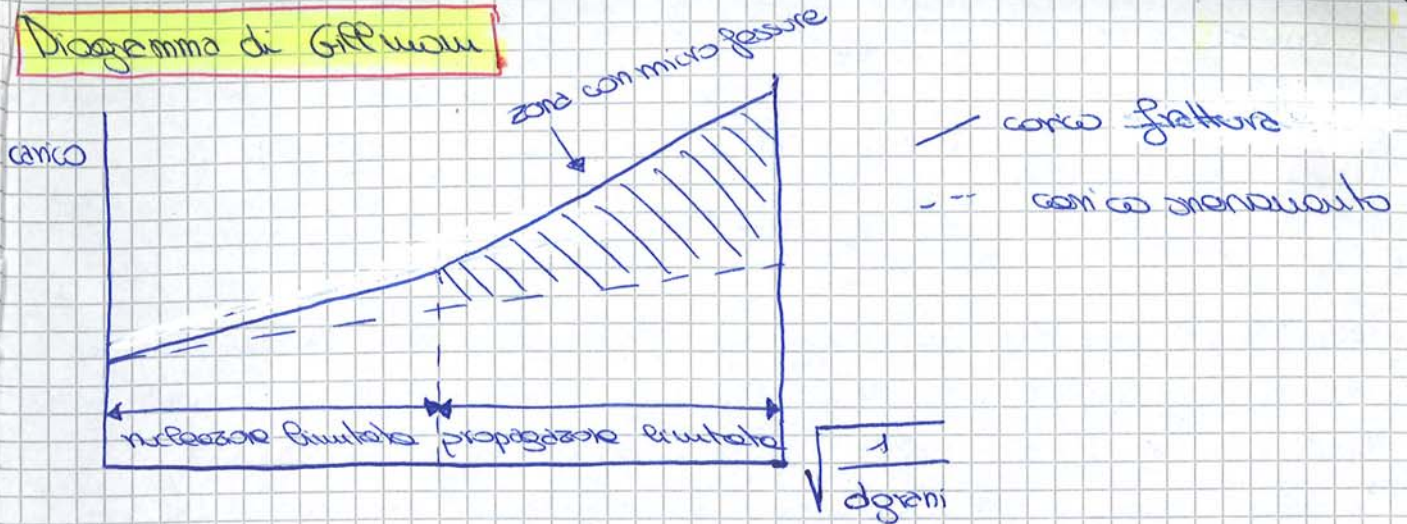
La presenza di deformazione plastica ostacola la propagazione della fessura in quanto si ha uno scorrimento con assorbimento di energia per la mobilitazione ed il movimento delle dislocazioni.

Se il lavoro di deformazione plastica è elevato, la fessura può essere arretrata e fermata.

Es. materiali che non danno sufficiente punto fermo molti sistemi di ancoramento equivalenti.

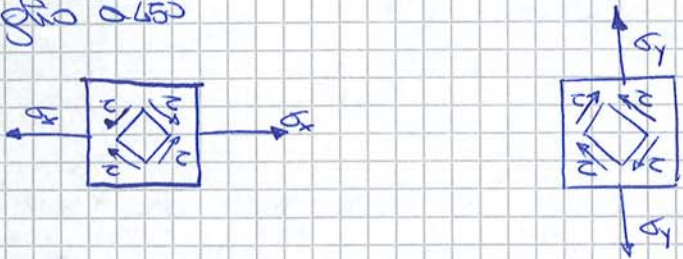
- Le dislocazioni assorbono inoltre energia dalla fessura in un modo particolare quando in una interazione fessura - dislocazione si formano sulle fessure delle teste di ostacolo rivolti

Diagramma di Griffith



Influenza del carico applicato

- Lo spettro è fornito da ogni sistema di carichi capace di produrre grandi carichi e lacerazione e piccoli carichi di taglio
- Tensione uniaxiale il carico è equivalente ad una serie di carichi di taglio a 45°



Se due carichi applicati a 90° l'uno dall'altro producono carichi di taglio su ogni faccia. Se si applica un carico perpendicolare (σ_x) il materiale subisce un carico di taglio \rightarrow si approssima lo scorrimento

- Tipo di materiale
- Effetto relativo di applicazione del carico
- Carico massimo \rightarrow distribuzione degli inganni
- Tipo di materiale

Il ferro esiste in due configurazioni

	CCC	CFC	CCC
T°	854	1400	1534

ovvero ha due forme allootropiche (parabando di ferro puro)

Il carbonio è una ferrolega con tenore di C < 2%
Carbonio presente

- sotto forma di soluzione solida Fe-C ^{retroscritto} negli acciai } nelle leghe
- sotto forma di composto (carburo) } nelle leghe
- sotto forma di elemento (grafite) → ghise

Il C si mescola negli spazi disponibili → nelle direzioni di massimo impacchettamento [111]

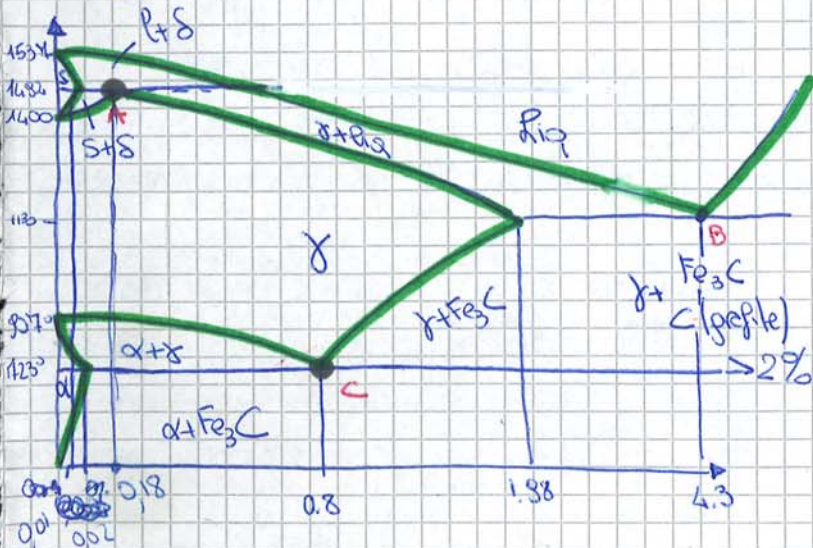
Nel ccc entra 0,02% di carbonio a 723°C → ferrite α (Feα)

Nel cfc entra ~ 2% di carbonio a 1130°C → austenite (Feγ)

Nel ccc entra ~ 0,1% di carbonio a 1492°C → ferrite δ (Feδ)

Diagramma Fe-C

3 soluzioni solide



Reactions:

	T	%
A = peritettico	1492°C	0,18
B = eutettico	1130°C	4,3
C = eutettoidale	723°C	0,8

→ perché campo delle ghise



$D_{\alpha} < D_{\gamma}$

Il peritettico a interesse per questo riguardo è raffreddamento *

Le solide formazioni avvengono per lo più in volume continue (+ lamination).

Globa inartata: (sua influenza il peritettico)

colore dal basso e a forma un primo liquido che solidifica sulle pareti, formata nuclei e nuclei cristalli piccoli *

* (A)

Austenite a 1492°C omogenea ferrite e liquido al 0,5% di tenore di carbonio
solido al 0,1% di carbonio, al raffreddamento di solido al 0,18% di carbonio

(23)

• Visto che c'è produzione di gradienti termici si formano dei dendriti cioè da

aumento l'attività del carbonio ovvero il C aggiunto come se fosse presente in quantità maggiore: ogni 3% di silicio è come avere 1% di C in più, quindi di notte ghise si ha il carbonio effettivo $+0,3\%$ di quello dato dal silicio

$$C_{eff} = \%C + 0,3\%Si$$

Inclusione: effetto dello zolfo aggiunto ulteriormente è 0.1% di Si sotto forma di leghe ferro silicio parte localmente si formano tratti nuclei di grafite che diventa di tipo S (lamelle) distribuite ed uniformi.

2 tipi:

- lamelle
- sferoidale

Se aggiungo anche il magnesio ottengo degli sferoidi → grafite sferoidale che è la grafite migliore, nelle lamelle il fattore di taglio è 13 volte sferoidale di S → consistenza per quello dell'acciaio.

Se raffreddo lentamente tutto il C finisce sotto grafite così dopo il tempo di far precipitare il C sotto forma di grafite.

Con tenori bassi di silicio e un raffreddamento veloce il carbonio non è presente sotto forma di grafite ma di carburi.

⊙ Importante per i trattamenti termici

Perlite: miscela meccanica ottenuta al punto eutettico con 41% di carburi e 59% di ferrite: $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$

È una trasformazione parzialmente influenzata dai meccanismi di diffusione: a 723° l'austenite (γ) si trasforma in perlite da diffusione (α tempo) controlla la trasformazione da γ a perlite → influenzata da T_{exp} (esponenziale) e tempo (rad quadr).

Se non ho caratteristiche di tempo e temperatura ho una trasformazione regolata dall'isteresi diventa meccanismo di diffusione, nello specifico nucleazione di nuove fasi e la crescita.

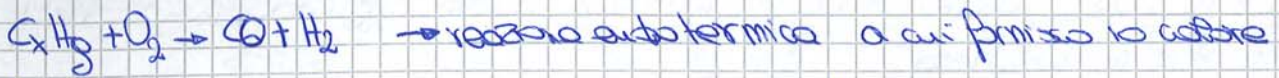
- Se T basso ho più nuclei (più distribuita dalla T di equilibrio) ma crescita di meno
- Se si blocca la diffusione si ha martensite, cioè la sola trasformazione da CCC a CFC

4

• Altro modo è quello di avere delle atmosfere prodotte in loco:



se questa reazione avviene ~~in un ambiente~~ in un ambiente chiuso per mancanza di ossigeno



Per miscela otturata si può avere carburante / decarburante (aggiunge loglio carbonio) riducente o ossidante



$$a_c = \frac{P^{CO}}{P^{CO_2}}$$

un aumento di CO_2 fa retrocedere la reazione e fa decarburare

Stesso ragionamento per la miscela $H_2 - H_2O$

Posso creare a basso costo delle atmosfere che per cui non modifico la composizione chimica.

Da un'alta temperatura raffreddando può essere esplosivo.

• Un altro trattamento è quello del tuttamento in vuoto

È un procedimento estremamente costoso dove la trasmissione del calore è fatta per irraggiamento.

I pezzi devono essere puliti perché il vuoto fa espandere sporcizia. (è zincato subito nel vuoto).

Il vuoto risolve tutti i problemi non avendo inquinanti.

Utilizzo il vuoto per avere superfici perfette, per esempio per gli stampi ma non tutti gli acciai possono essere utilizzati in vuoto perché dopo aver scaldato il pezzo lo devo raffreddare.

Il miglior raffreddamento è quello in gas.

Se il raffreddamento è fatto ottengo una struttura con poca turbolenza e molto cresciuta \rightarrow grani grossi, struttura grossolana.

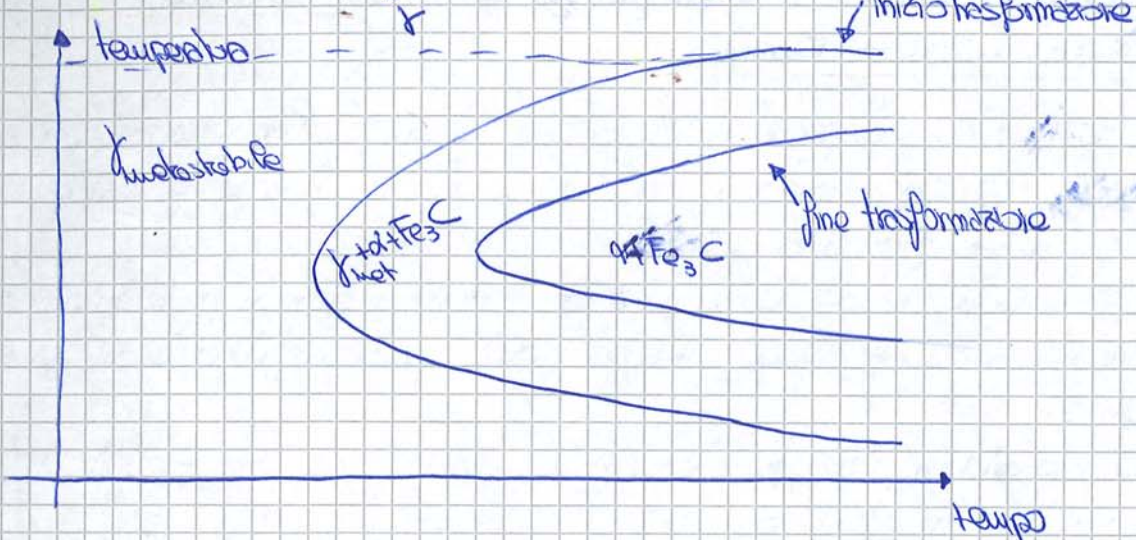
\downarrow raffreddamento ^{in forno} e superficie

RIGIATURA COMPLETA
(per aumentare)

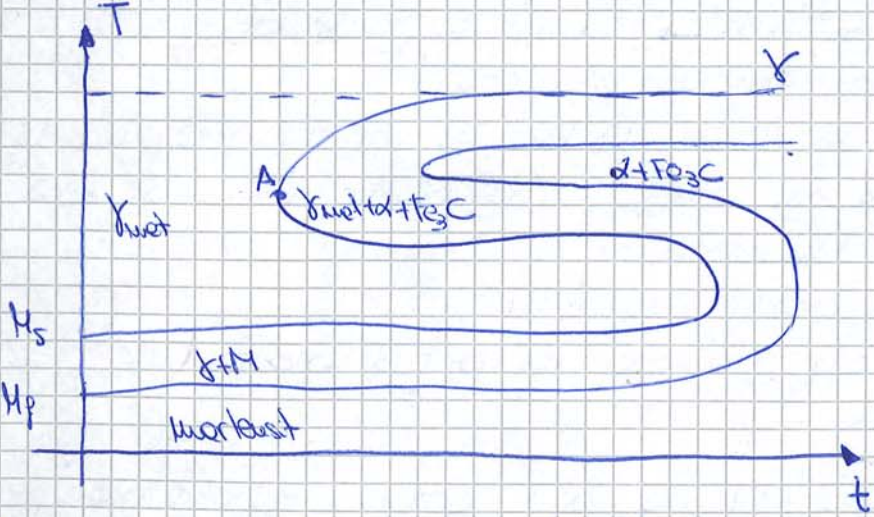
$1000 \rightarrow \alpha, \beta$ ZnO (lett. termico)
 $800 \rightarrow \text{''}$ FeO (lett. termico)

Le leghe a trattamento termico non possono essere a $T > 1000^\circ\text{C}$
 Come nel caso delle leghe di Al si formano dei composti non presenti nel
 diagramma di stato, anche negli acciai accade questo. (queste fasi non
 appaiono perché non sono di equilibrio)

Può avvenire la diffusione con passaggio tra cfc e ccc



Per T più basse:



CURVE TTT

M_s - inizio trasf. martensitica
 M_f - fine trasf. martensitica

Per avere una trasformazione martensitica deve stare a sinistra di A
 In queste curve partiamo inizialmente alla T di trasformazione e poi
 vedo un raffreddamento isoterma.

Possa spostare il tempo di tempo aggiungendo elementi leganti (coste
utilizzanti) e formando acciai legati. Qui l'austenite è più stabile quindi
 occorre più tempo per far avvenire la decomposizione.
 Possa ottenere un effetto analogo di con gli elementi formanti.

DOMANDE

- ① solubilità C nel Fe : massima nelle forme δ ($\alpha \approx 0.02\%$, $\gamma \approx 2.1\%$)
- ② $T_{\text{perlettica}}$ 1482° 0,13%
 $T_{\text{eutettica}}$ 1135° 4,3%
 $T_{\text{eutetoidica}}$ 723° 0,8%
- ③ fattore che determina anisotropia e un coefficiente:
 Alluminio e coeff di anisotropia
- ④ vantaggio dei grani piccoli : rafforza il materiale, impediscono il moto delle dislocazioni
- ⑤ Aumento modulo elastico : diminuisce all'aumentare della deformazione
- ⑥ % C nella cementite : 6,67%
- ⑦ metodi per limitare il creep : grani grossi con precipitati ai bordi di grano
- ⑧ % Fe nella cementite : 93,3%
- ⑨ nel rafforzamento con influenza la distribuzione dei precipitati : per fornire il rafforzamento devono essere tanti e di piccole dimensioni
- ⑩ differenza tra precipitati coerenti e non coerenti : quelli coerenti sono creati come lo materiale.
- ⑪ come varia il modulo elastico nella deformazione plastica : diminuisce all'aumentare della deformazione
- ⑫ da cosa dipende la distorsione interfaciale della parete : dalla velocità di raffreddamento
- ⑬ Differenza bainite e martensite rinvenite :
 bainite superiore ($\alpha_{T\uparrow}$) : $\alpha + Fe_3C$
 bainite inferiore ($\alpha_{T\downarrow}$) : $\alpha + \epsilon x$ (carboni interstiziali) } miscela bcc
 martensite : faccior rinvenimento dell'austenite } bcc
- ⑭ Quali elementi chimici determinano la durezza della martensite :
 %C in soluzione solida
- ⑮ Acciai a tenacità migliorata :
 conlegano zolfo 0,1% → migliore la tenacità del tracciato
 manganese 1,5% → aumento $T_{\text{eutettica}}$

metodi per porificare l'acciaio

- fusione per zone : scelta una zona e la parte di soli di ferro per ultima e la parte impura → costoso
- elettrolisi : tempo i legami termici ed elettrica

metodi di produzione dell'acciaio

- partendo da rottami : il rottame puro ha 2 metodi di scioglimento per poi aggiungere acciaio proveniente dall'affino per ridurre gli inquinanti
- affino : produzione "primaria" parte del minerale

Bonifica

Tempra + Rinvenimento / Ottenere finiti e consistenti finiti!

Invecchiamento / Indurimento

porta l'acciaio fino a T di stabilizzazione e raffreddamento veloce:

- 1) riscaldamento lento 150° per 1-2h → invecchiamento fragile
- 2) bassa temperatura per 1/2 ora
riscaldamento o riscaldamento ~ 550° e raffreddamento

Deidrogenazione

T=150° 4-24 ore ~ ricottura

Austenite (soluzione solida)

non è una fase omogenea (~~è~~ eterogenea dovuta a segregazioni e inclusioni)
molto stabile a T amb

Ferrite (α-Fe) soluzione solida primaria

A T < 912 e > 1600

Caratteristiche raffreddamento molto lento di
Fe₃C con 507% C elementi precipitati

se 0,2% C < 2,1 e raffreddamento molto lento miscelamento di
bordi di grano austenitici di cementite
Ferrite si impurisce sempre di più di C decomponendosi in particelle

Perlite

(miscela bifasica)

composto all'88% di ferrite e 12% cementite ed inizia a formarsi ai
bordi di grano austenitici

Bainite

miscela biferro

Superiore (T elevata) miscela di α + Fe₃C

chimicamente = perlite ma con cristalli più fini

Inferiore (T base) α + Fe₃C → precipitati

Martensite senza seiche

austenite raffreddamento velocissimo (non è una fase di equilibrio perché
dalla austenite α trasformazione alettrocinetica)
Si ottiene tramite tempera

ESAMI METALLOGRAFICI

~~Microscopio~~
microscopio ottico metallografico (a riflessione):

funzione per riflessione: illuminazione da sopra e i raggi vi entrano senza colpire il materiale

serve per vedere la struttura metallografica

se microscopio metallografico ad attacco → evidenzia le zone + eergotiche

non ad attacco → evidenza la distribuzione dei difetti
in

microscopio elettronico:

usa un fascio di elettroni che colpisce un campione che viene polarizzato su un display.

permette sia l'analisi della superficie di frattura sia un'analisi chimica puntuale.

DIFFRAZIONE AI RAGGI X

permette di ricavare informazioni sulla struttura cristallina sfruttando la legge di Bragg

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

$$\lambda = \left(\frac{hc}{e} \right) \cdot \frac{1}{V}$$

proprietà magnetiche

B = campo magnetico

~~linee~~ linee di B
" "

repulso → diamagnetico
attrazione → ferro magnetico

paramagnetico : non
glielo fa un caso
se c'è B o no

Diffrazione evanescente

Legge di Bragg $2d \sin \theta = n\lambda$

lunghezza d'onda raggi $X = 1 \text{ \AA}$
che mi servono -- strutture cristalline
- fasi cristalline
- dimensione dei grani

calcolo $\lambda = \left(\frac{hc}{e}\right) \frac{1}{V}$ con $V =$ potenziale penetrante

Controlli magnetoscopici

Intensità il pezzo in un campo magnetico così se ci sono difetti =
niente e linee di flusso deviate

Ho magnetizzazione secca e umida ma è applicabile solo di
met ferro magnetici

Controlli: con ultrasuoni

con liquidi penetranti

facile ottenere il pezzo da un fascio di ultrasuoni →
reclon difetto buona influenza o un assorbimento
solo per difetti superficiali

per vedere se un materiale è saldato non passa aerea $ZC = 0$ e
liquidi ne alto tempo di iniezione

PRODUZIONE ACCIAIO

Innesco: minerale coke, fondente e anodi in metallo ferroso → impianto di produzione di ghisa (atmosfera riducente)

I prodotti dell'alto forno sono: ghisa ($C > 2\%$) [con 1 ton minerale → 0.55 ghisa], scorie, gas

Nei converters (scambiatori di calore) i gas dell'alto forno vengono riciclati. Bruciano dando i converters e smiscelando l'aria che viene principalmente nell'alto forno. La ghisa non colata nel convertitore dove viene pompato o viene decarburata.

si lega con ossigeno e viene eliminato sotto forma di CO_2 e gas
 riduco il contenuto di carbonio
 se $C < 2\%$ → acciaio
 se $C > 2\%$ → ghisa

raffino base: eliminare ossidi acidi di manganese ed altri

raffino base: processo al fine di eliminare l'ossigeno residuo, così da evitare difetti nei prodotti finali
 tramite aggiunta di alluminio o silicio

Inoculazione: aggiungo nuovi leganti così da apportare modifiche strutturali e primario effetto di raffino base: colata continua

il metallo fuso è colato, raffreddato e passa attraverso dei rotoli che hanno la colata. colata continua: bene non lavorata fino subito
 laminazione primaria (a caldo) raffino base
 effetto di raffino base → immersione il materiale in una vasca piena di acido cloridrico
 l'ossido in superficie. raffino base

Dopo tutto questo il pezzo subisce una laminazione a freddo e poi a Tamb, ottengo un materiale in crollato (laminato intermedio) che viene laminato per dare il prodotto e per ultima laminazione a freddo.

Per proteggere la superficie effetto un bagno di zinco.

METODI DI PRODUZIONE DELL'ACCIAIO

① partendo dai rottami (sfrutto la riciclabilità dei materiali metallici).
 processo effettuato nella acciaio elettrico. raffino base in aria magnetica così da poter sfruttare elettricità a basso costo (con linee ioniche).
 Il rottame passa in due estratti fondendosi - dai controflusso se vi è presenza di piombo e rame (impurità). Da comunque aggiungere acciaio proveniente dall'alto forno industriale.

② partendo dal minerale
 processo effettuato nella acciaio integrato → processo diretto nella produzione dell'acciaio.