



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1910A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Gregnol Gianluca

MATERIA: Metallurgia - 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.**

Metallurgia

(1)

- Concetti di Termodinamica utili → qua e là ogni tanto li scriviamo

I materiali metallici sono quelli che hanno caratteristiche metalliche.

Ma quali sono queste caratteristiche?

- conduttività di tipo elettrico
 - - permettono la mobilità degli elettroni
- conduttività termica
- La saldabilità è una caratteristica che unifica sia la conduttività elettrica che termica.
- Duttilità
 - ↔ inversamente proporzionale alle resistenze meccaniche
- Deformabilità plastica
 - ↔ difetti dei materiali
- Lucentezza → possibilità/capacità di riflettere la luce → specchi
- Proprietà magnetica (solo alcune categorie)
 - Permette la produzione e il suo uso in condizione di sicurezza
 - Il controllo della deformabilità plastica permette il controllo delle proprietà del materiale

[Trattamenti termici e termochimici → modificano struttura a livello atomico, modificando la grandezza dei grani, ...]

def → Acciaio: Ferro lega contenente Carbonio

$C \leq 2\%$ → Acciaio

$C > 2\%$ → ghise

- Le leghe possono essere costituite dal solo metallo puro o composta da metallo-non metallico. Quindi dire lega metallica è errato, perché è come se si ripetessi 2 volte "metallica", dal momento che per definizione le leghe contengono metalli
- Il metallo di solito viene trovato sotto forma di OSSIDO ($Me + O_2$)
Ma gli ossidi non hanno caratteristiche metalliche e non sono leghe

Come si producono i materiali metallici ?

②

Costo grossolano di alcuni materiali:

Ferro → da qualche centesimo a 2/3 €/kg

Alluminio → qualche decina di euro (circa 10 volte il ferro)

Titanio → circa 50/100 €/kg

Il costo è relazionato alla disponibilità e alla produzione.

Zona di Brillouin

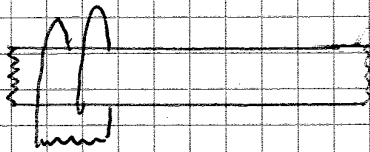
Conduttore usato molto → Rame → facile da lavorare

In elettrotecnica interessa il Rame PURO per ottimizzare la conduttività

Se scaldo piriti cuprifere, si ottiene rame impuro.

Per purificarlo il costo si alza. Metodi di purificazione:

① Fusione per zone → passaggio del pezzo con AC, che crea induzione termica, tramite solenoide



Fonde però solo una zona del complessivo

② elettrolisi → anodo + catodo

Altri metalli conduttori → metalli nobili → peso eccessivo

Bisogna evitare che avvengano fenomeni di ossidazione (dei metalli)

Nell'acciaio inox, l'acciaio è coperto da una pellicola di ossido molto compatta, che ci isola il materiale dagli agenti esterni (e infatti non conduce)

Un altro elemento usato come conduttore è l'Alluminio

A parità di sezione conduce di + il Rame, ma a parità di peso conduce di più l'Al.

L'Al diventa vantaggioso quando bisogna trasferire elevate potenze.

Per minimizzare le perdite di potenza $P = RI^2$, allora alzo le tensioni

Nel caso del Fe si può, ad alte T, disintegrare, compere, ...

③

Infatti il Fe ha diverse tipologie di ossidi (ematite, ...)

con \neq % Fe ognuno, e di % O_2 .

Gli strati che vengono a formarsi sono metallo a contatto con l'ossido, e ciò porta alla distribuzione del metallo

Eccezioni ad es. Al, Ti, acciai inox

Forme uno strato autopassivante (superficie inerte all'ossidazione)

① Al_2O_3 , Ti_2O_2 per Alluminio e titanio formato 1 solo ossido

② Questo ossido è molto aderente alla superficie

③ Molto compatto come ossidi

ciò mi isola il materiale dall'ambiente esterno.

Zinatura: zinco materiale sacrificabile, reagisce al posto del ferro
 Sopra lo Zn si fa un trattamento di passivazione, che una volta era un ossido di cromo. Ora quest'ultimo non si può usare perché cancerogeno

• Acciai inox \rightarrow molto più costosi!

Hanno almeno 13% Cromo \rightarrow interviene nelle anodi si ossidazione

Spinello \rightarrow ossido formato da una parte bivalente ed una trivalente

$\rightarrow FeO \cdot Fe, Cr_2O_3$ ossido unico + compattezza ed aderenza elevate

ciò garantisce un'usura di minore notevole del materiale.

Resistono alla corrosione, ma bisogna che non si meschi all'interno dell'acciaio.

Se abbiamo 2 fasi \neq , si forma una "pila" (anodo + catodo).

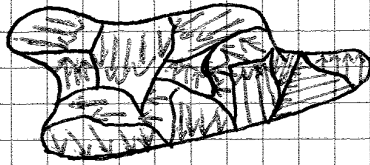
Quindi gli inox devono avere 1 sola fase (monofasici) \rightarrow costoso.

Se fase FCC \rightarrow Ni austenitici (18% Cr , 8% Ni) \rightarrow i migliori

Il Carbonio fa malissimo agli inox (Cromo tende ad unirsi al C)

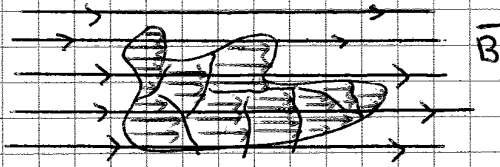
Si aggiungono perciò stabilizzanti (togliete C costa un po') che si legano a C, ma almeno rimane la matrice di Cr.

dette DOMINI DI WEISS. I confini di tali zone sono LINEE DI BUCHK ④

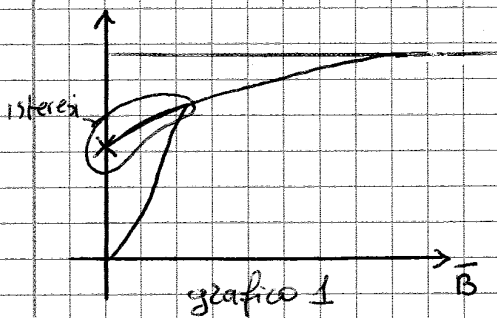


situazione iniziale (no \vec{B})

Applicando \vec{B} , tutti i domini progressivamente si orientano $\parallel \vec{B}$.



Tutto ciò ovviamente dipende dall'intensità di \vec{B} .



Questa condizione di aumento del \vec{B} però non può continuare all'infinito, una si "arresterà" la crescita con l'allineamento di tutti i domini (condizione di saturazione)

① Questo fenomeno del ferromagnetismo vale sempre?

No, ho una temperatura al di sotto della quale vale, una al di sopra della quale ho paramagnetismo. Temperatura di Curie è il nome della Temperatura di separazione (il confine) tra i 2 comportamenti ed ha un valore ben preciso.

Il materiale diventa PARAMAGNETICO quando si distrugge l'ordine dei domini magnetici.

Perché si distruggono? Per motivi energetici \rightarrow a T alte prevale il disordine

\rightarrow Temperatura di Curie } FERRO: 768°C
 (carboni + carboni) } Cobalto: $1114/1115^\circ\text{C}$
 } NICKEL: $353/354^\circ\text{C}$

Ferrite = Fe_α (CCC) \rightarrow bassa T

Austenite = Fe_γ (CFC) \rightarrow media T

Ferrite δ = Fe_δ (CCC) \rightarrow alta/altissima T

Ferrite α paramagnetica = Fe_β

$768 < T < 907^\circ\text{C}$ (ferro puro)

• Lucentezza

5

1) I materiali metallici sono degli specchi, ma spesso questi vengono coperti da vernici o da ossidi;

2) la superficie deve essere piana.

In natura però essendo i metalli ricoperti (di solito) di ossido, e non essendo piana non si trovano facilmente materiali metallici lucenti / che riflettano la luce.

Come risolviamo questa situazione?

Possiamo ad esempio rimuovere lo strato di ossido e renderla meccanicamente piana.

A cosa serve allora questa caratteristica?

Specchi per parabole / antenne, ma soprattutto per usi analitici (es. raggi X)

- Ci ricordiamo che i materiali cristallini sono quelli dotati di una struttura ordinata e ripetitiva.

- Legge di Bragg's ci permette di provare che i materiali metallici (ma anche vale per i cristallini) hanno una struttura atomica e che sono disposti in un certo modo:

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

d = distanza tra gli atomi

θ = incidenza

λ = lunghezza d'onda

n = # intero

- I raggi X ci permettono di capire la struttura dei materiali cristallini.

- ultrasuoni utili in produzione per verificare ad es. bontà saldatura.

- metodi magnetici

- liquidi penetranti → cicche ingranaggi per lo più.

- quantometro (spettrometro di massa) → analisi della mole (soggettiva) e quella precedentemente usata rispetto al quantometro.

- analisi al microscopio → materiali metallici sono opachi, cioè non lasciano passare la radiazione.

microscopio a trasmissione, a riflessione (o inverso),

[digeribile] • segregazione → disomogenea (rispetto al diagramma di stato)

- inglobatura → impregnare il campione in una resina termindurente (6)
oppure (se la T è troppo alta, ad es per ^{leghe} alluminio)
si usano resine bicomponenti (2 liquidi ≠ che polimerizzano)

Termoindurenti → T polimerizzazione 120°C - 130°C

Bicomponenti → " " " " più basse, ma + costose e non
da come risultato finale una bontà

Conduttrici → formata da pigmenti che conducono corrente.
perché la si fa? (non è obbligatoria)

A volte per maneggevolezza (campione troppo piccolo), oppure per
proteggere i bordi o la superficie da modifiche da porterebbero
a perdita di informazione (es. ricoprimenti spessi μm).

Si ingloba anche per evitare l'arrotondamento dei bordi e quindi
per permettere la messa a fuoco del campione (max ingrandimento
con microscopio ottico è 1000 volte).

Altra ragione è la classificazione (etichettare) del materiale
campionato, o per l'automazione dei processi.

Se tutti questi problemi non ci sono, non si ingloba.

- lucidatura del campione

Si usa la carta abrasiva (contengono carburo di silicio) che ha # grad
cioè il # di particelle per unità di superficie.

Di solito si parte da una carta più grossolana (riso di grad) e si lucida
o a mano o con una lucidatrice, con lubrificante l'acqua, e procede
finché non ho eliminato le tracce delle lavorazioni precedenti (il taglio).

Finita questa prima lucidatura, sciacquo il materiale e passo ad una
carta più fine (riso di grad), ruotando il campione di 90° rispetto alle
posizione originale, fino ad eliminare i "residui" delle prime carte.

Si ripete il processo con carta ~180 di grad e le successive.

Alla fine avrò ottenuto un campione piano, ma non ancora perfetta-
mente lucido. Si passa quindi ai pani di velluto.

energia, cioè i bordi di grano, che viene corrosa, e perciò non si rifletterà più la luce. Così riusciamo a capire la distribuzione.

[caso ferro monofasico puro].

Nel caso di acciaio, il carbonio ($< 2\%$) si scioglie nel ferro (carbonio interstiziale o intrusivo). Il restante carbonio si trasforma in carburo (o cementite Fe_3C). La cementite si lega alle ferrite, (lamelle) e si ha la perlite [$\sim 81\%$ ferrite, $\sim 19\%$ cementite].

Nelle perlite si hanno 2 fasi con \neq potenziale elettrochimico in presenza di elettrolita, cioè si ha una pila di corrosione (an-cat). Quindi in presenza di perlite abbiamo fenomeni corrosivi, e quindi vediamo scuro

Quindi nel caso più semplice di acciaio vedremo (post attacco):

- cristalli di ferrite (bianchi) con bordo grano (scuri)
- zone scure perlitiche
- Microscopio elettronico (SEM = scanning electron microscope)

Un fascio di elettroni (generato dal riscaldamento di un filamento di tungsteno e accelerato da un campo magnetico) va ad incidere sulla superficie del campione e si "riflette".

Arriva fino a ~ 100000 ingrandimenti. Lavora nel vuoto.

Ma perché si usa? Il campione non deve essere speculare, però deve essere conduttivo. Si studiano inoltre le superfici di frattura. Se avessi materiale non conduttivo? Devo fare la metallizzazione cioè ricoprire di un sottile strato conduttivo il materiale

(oro, grafite, ...). Producono raggi X. A seconda della lunghezza d'onda λ ^{e dell'energia} ritorna soppiano il materiale. Di solito il SEM è equipaggiato con il EDS (sonde), che misura l'energia dei raggi X ~~emessa~~ del campione. Più il materiale è leggero, più appare scuro.

Il TEM (elettronico a trasmissione) ha ingrandimenti > 100000 e viene usato per ricerca e non per scopi industriali.

monocromatica, permettendo l'analisi di intensità in funzione (θ) di λ .

- ① La prima funzione della Legge di Bragg in questo fenomeno, è la fluorescenza, cioè possiamo risalire alla natura del materiale analizzando λ per cui tale legge è rispettata.
- ② La seconda funzione è quella di poter individuare "d" (distanza piani) e quindi identificiamo la struttura (cc, cfc, ...) e le costanti reticolari (fasi)
- ③ Si riesce inoltre anche a valutare, tramite lo spostamento del reticolo, il contenuto degli elementi interstiziali, se siamo in presenza di una soluzione più o meno carica.
- ④ In ultimo i raggi X permettono la valutazione delle tensioni residue con una certa precisione.

Prima di esaminare le deformabilità plastiche, analizziamo un attimo la produzione di materiali metallici.

Produzione dei materiali metallici

Se un sistema è libero di evolvere, evolve sempre verso il minimo di energia.

Ricordiamo che l'entalpia "h" è "l'energia posseduta" dal sistema, mentre l'entropia "S" è una "misura del disordine".

Definiamo disordine la compresenza di più sistemi ordinati.

Più sistemi compresenti danno più possibilità di evoluzione, e quindi si può evolvere verso il minimo energia.

Si capisce quindi che il disordine è sintomo di maggior possibilità di raggiungere la condizione di minimo di energia.

Quindi l'entropia misura della molteplicità di sistemi ordinati a disposizione delle nostre configurazioni

$+S \rightarrow -\text{energia}$.

(9)

Vacanze → difetto di equilibrio

difetti di inguainamento coinvolgono la costruzione reticolare a livello di volume.

Difetti di punto → vacanze, interstiziali, ...

- Vediamo ora le vacanze e le analizziamo meglio:

vacanze nascono perché gli atomi tendono ad andare verso la superficie, perché lì sono meno legati, quindi è più libero e ha S maggiore e quindi abbassa la sua energia.

Dal punto di vista energia, una vacanza per essere creata richiede lavoro, perché bisogna rompere i legami e fare "il salto".

Chi gli dà l'energia? Le vibrazioni termiche del reticolo, che sono causate dall'aumento di T.

Sia:

$N_0 = \# \text{ atomi}$, $N_v = \# \text{ vacanze}$ $W_v = \text{lavoro per formare 1 vacanza}$.

$N_v \cdot W_v = \text{energia necessaria (per formare } n \text{ vacanze)}$

entropia intrinseca → trascurabile

entropia di miscela:

equazione probabilistica

$$S_{\text{mix}} = - (N_0 + N_v) k \left[\frac{N_v}{N_0 + N_v} \ln \frac{N_v}{N_0 + N_v} + \frac{N_0}{N_0 + N_v} \ln \frac{N_0}{N_0 + N_v} \right]$$

Boltzmann

$$S_{\text{mix}} = k \left[(N_0 + N_v) \ln (N_0 + N_v) - N_v \ln (N_v) - N_0 \ln (N_0) \right]$$

Per l'eu. libera:

$$G_v = N_v \underbrace{W_v}_h - T \cdot S_{\text{mix}}$$

Qual'è il numero di vacanze per cui sarà minimo? ?

Derivata!

$$\frac{\partial G_v}{\partial N_v} = 0 \quad W_v + T k \ln \left(\frac{N_v}{N_0 + N_v} \right) = 0$$

Perché si presume che $N_v \ll N_0 \rightarrow \frac{N_v}{N_0} = e^{-\frac{W_v}{kT}}$

Come usciamo da questa situazione?

(10)

Introduciamo qualcosa che mi "tolga" (reagisca) con l'ossigeno e che mi scaldi anche il metallo, favorendo le dislocazioni: il Carbonio!

L'ossido si dissocia, producendo ossigeno, che va ad essere assorbito da Carbonio.

Quando capita ciò?

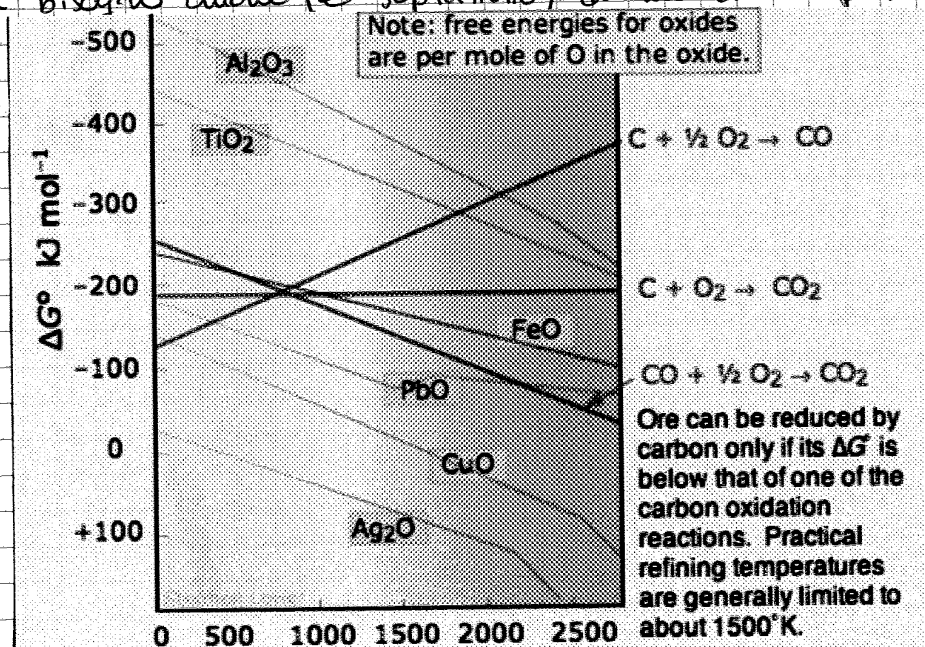
Quando l'en. libera del Carbonio è < dell'en. libera dell'ossido e del metallo. Bisogna quindi valutare le energie degli ossidi. (Carbonio puro CO oppure CO₂)

• Diagramma di Ellingham-Richardson (energia $\Delta G - T(K)$)

Avviene la reazione quando le curve degli ossidi superano (hanno energia >) la curva di CO, CO₂ (a energia minore a questo punto).

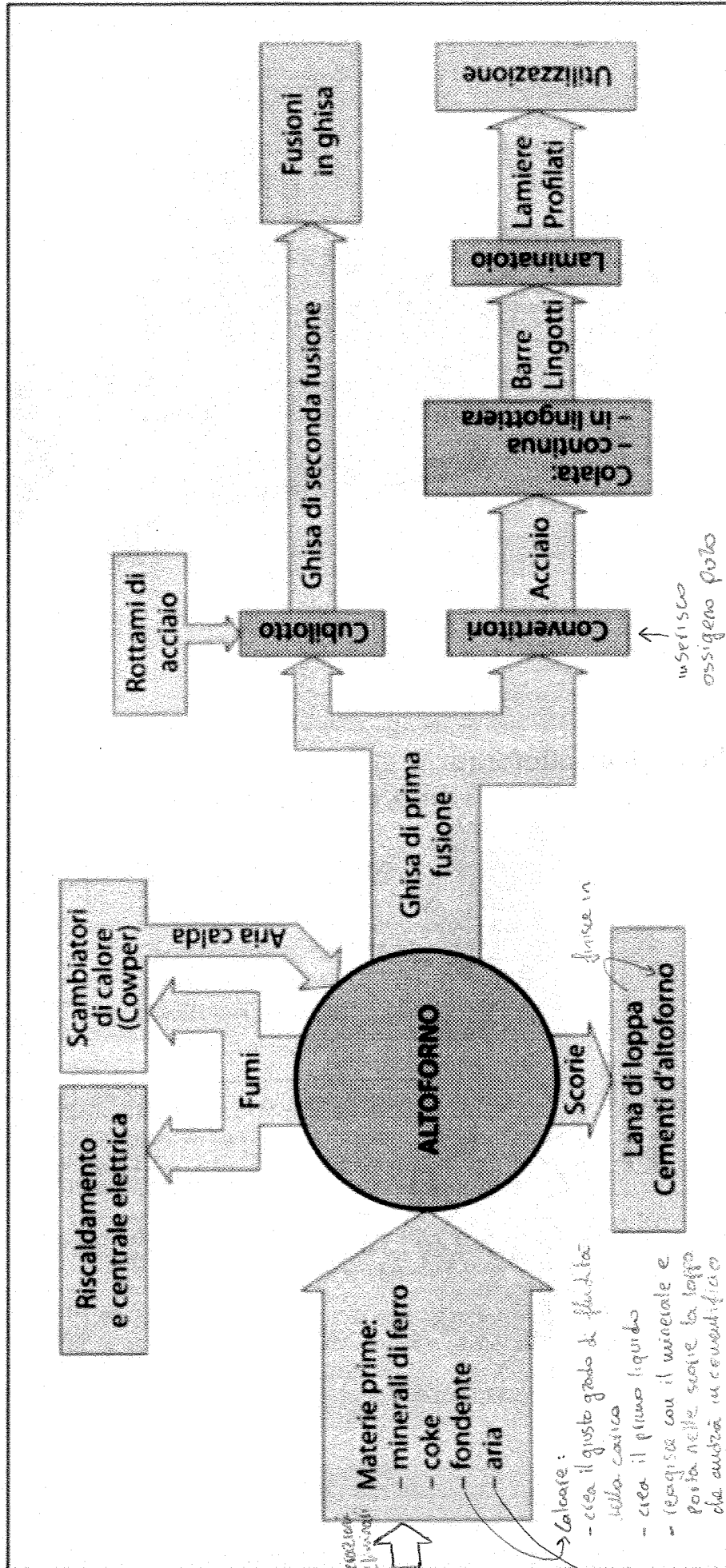
CO₂ è una retta //asse x (Temperatura), la CO cresce con T sulla scala dei ΔG (la scala ha # negativi ↑ e # positivi ↓) perciò in realtà è come se decresse.

Perciò per l'alluminio (ossido) ciò si verifica a T non industrialmente fattibili (~2500 K), allora si può partire dal minerale oppure si passa tramite acciaieria elettrica (riciclo), che però ha bisogno anche (e soprattutto) di materiale "fresco".



← Diagramma di E-R.

FASI DEL PROCESSO SIDERURGICO



Prima di introdurre tutta la roba nell'altoforno, ci sono delle operazioni preliminari: (12)

- preparazione del minerale → riduzione a blocchi/pezzi sufficientemente piccoli e pulito da ciò che non è minerale ferroso (prima pulisco, poi frantumo).
Dunque deve essere agglomerato in coke + fudente.

• Cos'è il coke siderurgico?

Prodotto che si ottiene dalla distillazione del carbon fossile.

La distillazione consiste nell'impilamento di carbon fossile e riscaldamento a $150 - 200^\circ\text{C}$. Ciò che evapora è una gran quantità di alcool metilico (sottoprodotto dell'acciaieria) e poi tutta una serie di gas poco salubri, quali diossina e company.

• L'agglomerazione in cosa consiste?

Si fa una pressurizzazione in brick (palline) che contengono queste 3 sostanze: coke, calcare, minerale.

È nella fase di produzione di coke e di sinterizzazione che avviene il maggior inquinamento.

• Come funziona e come è fatto l'altoforno?

- Tramoggia (hopper) → distribuisce uniformemente la sostanza (brick o pellet) che riceve una spinta inversa dai gas.

- Dalla zona delle piastre tubifere si immette aria.

Ma da dove viene? → Coupers (scambiatori di calore) [di solito 4].

2 di questi bruciano il CO presente nei gas di scarto, e per fare ciò vengono surriscaldati tramite i gas dell'altoforno stessi. Gli altri 2 sono in modalità corrente d'aria. Quando i primi hanno raggiunto la T voluta, si aprono delle valvole e si forza l'ingresso di aria, che così si riscalda e può essere immessa nell'altoforno.

L'aria in ingresso nell'altoforno può essere addizionata con catrame o metano per favorire il surriscaldamento.

(17)

• Quali sono le caratteristiche di tali acciai?

- σ_s + basso possibile (finché non lo raggiungo, non deformato) così da avere anche minor ritorno elastico
- Δ + elevato possibile
- E molto elevato \rightarrow minor ritorno elastico
- coeff. di anisotropia (non aver le stesse proprietà ovunque)
misura il rapporto tra $\frac{E_{lunghezza}}{E_{spessore}}$

• Come si campiona?

- Composizione chimica pochi elementi leganti
- Grandezza del grano più grosso possibile (fino a un terzo)
- il coeff. di anisotropia si regola con ritzuro di alluminio (0,04%)

che impedisce la ricottura (precipitando)

l'ispessimento dei piani di scorrimento (direzione spessore)

In fase di avvolgimento dopo laminazione a caldo, si deve tenere il materiale alle T minore, anche evitare ulteriore precipitazione.

Deformabilità plastica - le modalità di frattura

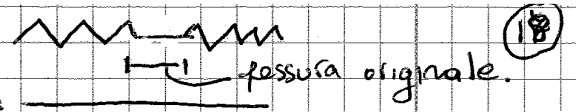

Il nostro materiale deve essere resistente e Tenace (cioè resistere/assorbire grandi quantità di energia).

Con le prove a trazione, si giunge alla rottura del provino.

- Tale rottura dipende da una serie di parametri: tipo di materiale, Temperatura, tipo di sollecitazione, velocità di applicazione del carico (nel caso di esplosione non si dà il tempo necessario al movimento delle dislocazioni, in tal caso la deformazione avviene per geminazione [i piani scivolano di una quantità $<$ distanza atomica]).


• La frattura si può dividere in:

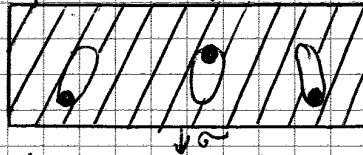
- duttile \rightarrow ha deformazione plastica
- fragile \rightarrow no def. plastica, poco assorbimento di energia e grande

Si ha una situazione del genere:  (18)
 che però macroscopicamente sembra: 

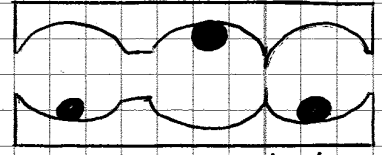
Il meccanismo di frattura è la nucleazione di queste cavità e poi la crescita. Perché si vengono a creare queste nucleazioni?

Per le dislocazioni, che sono quelle che danno l'energia per la nucleazione


 particelle e
 stato tensionato
 (cattivi assiate)



lo sforzo di taglio mi
 crea un accumulo di
 dislocazioni lungo le
 particelle.



Questo accumulato fa sì
 che ci sia il distacco
 di una particella, e si
 crea la fessura.

formazione

Si ha il distacco quando l'energia fornita dalle dislocazioni $e' =$
 all'energia necessaria per formare nuovi superfici (energia superficiale) e
 quindi permettere la nucleazione

La deformazione per nucleare una cavità E vale:

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

$R =$ raggio particella

$\gamma =$ energia superficiale

$G =$ modulo elast. tang.

La tensione critica per nucleare queste cavità che dipende da:

$$\sigma = \sigma_0 + (4G\gamma)^{1/2} \cdot \left(\frac{f^{2/3}}{R} \right)^{1/2}$$

$f =$ frazione volumetrica particelle

$R =$ raggio particella

crescita Ora che sono nucleate, c'è la fase di crescita, che dipende dal
 # di particelle, non + dal raggio:

$$e^{E/2} (3E - 2) = \left(\frac{2}{3} \pi \right)^{1/2} \frac{1}{2} K f^{-1/2}$$

• Nucleazione di fessure

(19)

Se per qualche motivo ci sono impedimenti allo scorrere delle dislocazioni, queste si accumulano e creano fessure.

• Il materiale deve avere grani piccoli per avere + rigidità.

- Le dimensioni delle fratture dipendono dalle dimensioni del grano.

grano grosso la frattura a $\left\{ \begin{array}{l} \text{nucleazione limitata} \rightarrow \sigma_{rott} \approx \sigma_y = \sigma_{nucleazione} \\ \text{propagazione limitata} \rightarrow \sigma_y \neq \sigma_{rott} \end{array} \right.$

grano piccolo

• Influenza del carico applicato

Quando limitiamo le tensioni di taglio, favoriamo i meccanismi di frattura fragile.

3 carichi di trazione a 90° l'uno dall'altro creano 2 componenti di taglio opposte. Se aggiungiamo un 3 carico \perp a sarà uno stato di tensione idrostatica nel quale il materiale non subisce + alcun carico di taglio \rightarrow soppressione dello scorrimento

• Fattori che influenzano la frattura fragile.

- Bassa T

- Elevata velocità di applicazione del carico

- carico triassiale \rightarrow no taglio, solo sfaldatura

- tipo di materiali

Gli intagli un fanno diventare il carico che viene a triassiale. a cause delle generazione di sforzi

• Frattura di fatica

Si origina in superficie o in prossimità di un difetto.

Si propaga lentamente, fino a che la sezione resistente è talmente piccola che il materiale si spacca. Ci sono 2 zone: zona di innesco e propagazione e la zona di cedimento.

Striature (marker) nelle zone lisce (innesco) sono indice della presenza di tale fenomeno

e impediscono al grano di ingrossarsi mettendosi a bordo grano (20)

- Laminazione in controllo

a T basse e grano allungato

- Soluzione solida

Introduco un 2° elemento \rightarrow \neq dim. atomiche \rightarrow dislocazioni + lent

Soluti sostituzionali interagiscono solo con dislocazioni a spig

Interstiziali interagiscono con il piano di scorrimento delle dislocazioni e quindi interagiscono sia con le dislocazioni a spigolo che a vite.

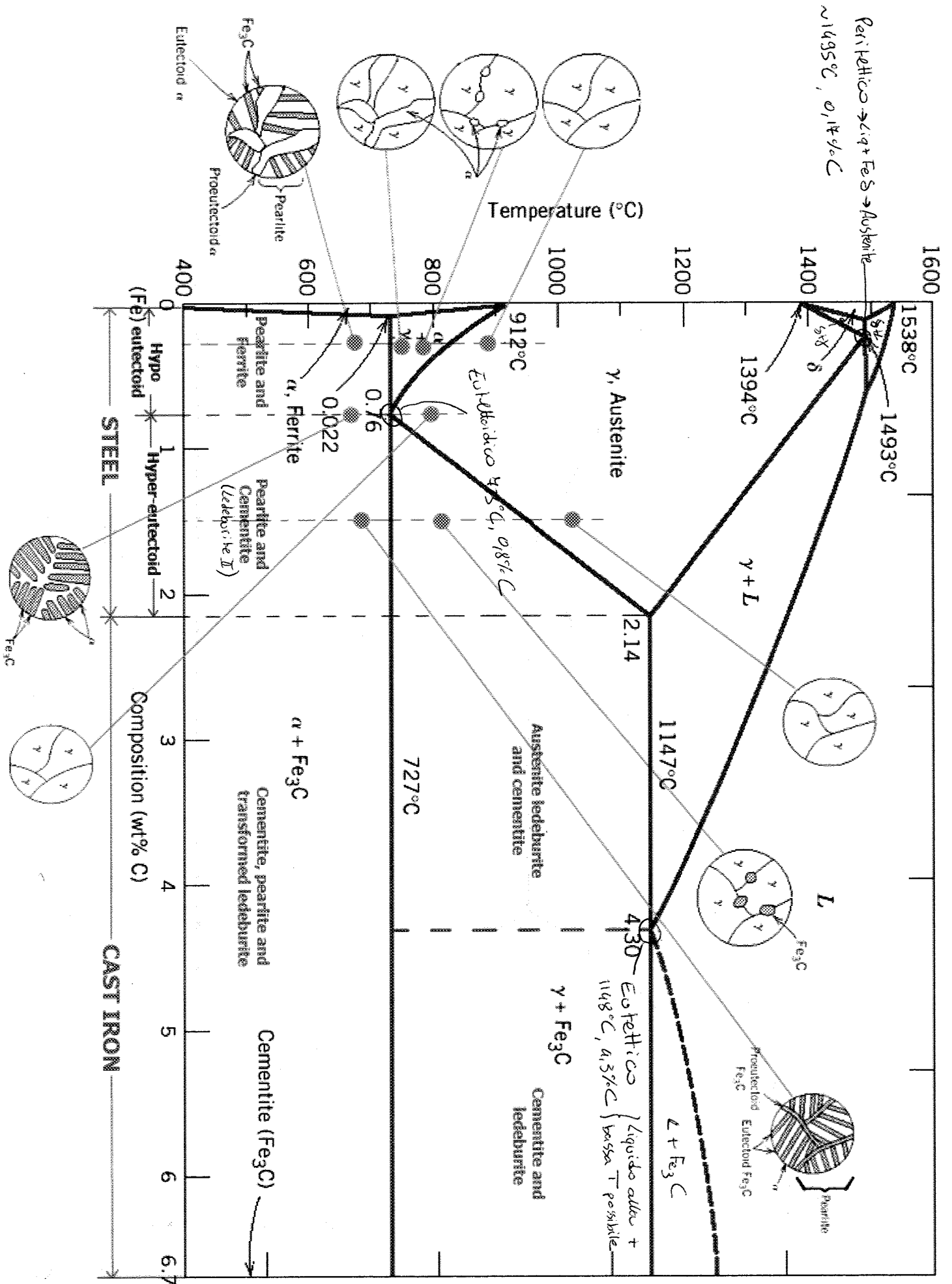
- Particelle di 2° fase

deformabili \rightarrow coerenti \rightarrow interfaccia comune e piani di scorrimento

simili e sono attraversabili da dislocazioni \rightarrow particelle che attraversa

si deforma. Se la particella è troppo grossa \rightarrow incoerenza della particella

indeformabile \rightarrow incoerente \rightarrow interfaccia non comune e non è attraversabile da dislocazioni



Nel CFC si avrà solubilità 1000 volte maggiore che nel CCC. (21)

Nel caso interstiziale la solubilità sarà molto limitata ($< 1\%$)

Nel caso sostituzionale la solubilità può anche essere completa (es. Fe-Cu)

Quindi si capisce da ciò che nel caso interstiziale, che avviene con deformazione reticolare, si ha uno stato di tensionamento alto del reticolo. Ogni aumento di %
 diminuzione cambia molto il reticolo.

Nel caso sostituzionale invece la % non cambia quasi nulla, essendo di grandezza opportuna.

• Ci attendevamo dal dds 3 soluzioni solide:

- Fe α \rightarrow solubilità max 0,02% a $T = 727^\circ\text{C}$

- Fe γ (austenite) \rightarrow solubilità max $\sim 2\%$ a $T = 1135^\circ\text{C}$

- Fe δ \rightarrow solubilità max 0,1% a $T = 1492^\circ\text{C}$

• Quando si supera la max % di solubilità, C non si scioglie + in Fe e si crea un composto intermetallico stechiometrico detto CEMENTITE (Fe_3C) che è composto al 6,67% C.

Se ho $< 6,67\%$ C si formerà $\text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe}$

Se ho $> 6,67\%$ C si formerà $\text{Fe}_3\text{C} + \text{C}$ (grafite)

• Il diagramma Fe-C arriva fino al 6,7% C

• Punti notevoli:

① - Peritettico \rightarrow avviene a $\sim 1492^\circ\text{C}$ e al 0,18% C

Si ha una fase solida di austenite che genera poi una fase solida di Fe δ + una fase liquida (o viceversa le 2 raffreddandosi generano austenite)

② - Eutettico \rightarrow avviene a $\sim 1148^\circ\text{C}$ e 4,3% C

Un liquido L genera 2 solidi di \neq composizione: $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

③ - Eutettoidica \rightarrow avviene a 723°C e allo 0,8% C

Una fase solida Fe- γ raffreddandosi genera 2 fasi solide di \neq composizione

Fe- γ \rightarrow Fe- α + Fe_3C (nota: Pearlite = 11% Fe_3C + 89% Fe- α)

È un processo diffusivo che dipende da T e tempo e genera Nucleazione

Si introduce del Si, che aumenta l'attività del C, così il C si comporta come se ce ne fosse di +. (+0,33% ogni 1% Si). (22)

Quindi è come se spostassimo verso sx i punti critici.

In tal caso si parla di C equivalente e il Si ha effetto grafittizzante.

- Quindi come ci comportiamo?

Arriviamo fino al 3,3-3,4% C e poi sfruttiamo il Si per arrivare al 4,3% C equivalente.

- Inoltre al momento della solidificazione del getto, faccio l'INOCULAZIONE, cioè aggiungo un ulteriore 0,1% Si (ferrolega di Si in polvere).

Questi graffetti localmente creano forte attività di C, così che la lega sia ipereutettica (localmente!).

In tal modo la prima fase che solidifica è la grafite, che non va più a bordo grano, ma è uniformemente distribuita.

In tal modo si crea ghisa lamellare (lamelle di grafite).

- Noi però vogliamo avere ghisa sferoidale (sfere di grafite), perché ciò produce una minor tensione superficiale ed un ridotto danneggiamento della matrice. Inoltre tale tipo di ghisa esercita una forza di arresto per le cricche!

Per ottenerla, aggiungo 0,01% Mg post inoculazione.

• Vantaggi ulteriori sono la maggior competitività con gli acciai ed un fattore di intaglio 3 rispetto al 13 della lamellare.

- Alti tenori di Si e raffreddamenti veloci → grafittizzazione

Bassi " " " " bassi → carburazione

- La ghisa bianca non contiene C grafittico, ma solo Fe_3C .

- Ledeburite I = Austenite + Cementite = $Fe-\gamma + Fe_3C$ per $727 < T < 1148^\circ C$

Ledeburite II = Ferrite + Cementite per $T < 727^\circ C$ (lento raffreddamento)

- Ghisa trattata → Grafite + Fe_3C mescolati (Grafite a losette dovuta ad alte vel. di raffreddamento)

③ Non liquefare il metallo → fenomeni di liquefazione

(23)

• Raffreddamento

Ci sono diversi tipi di raffreddamento

① Ricottura

- Si riscalda il pezzo ad una $T < T_{fusione}$ e successivamente si fa raffreddare lo stesso nel forno (segue raffreddamento del forno)

Essendo il raffreddamento molto lento, si vengono a creare grani grossi, che danno poca resistenza meccanica e fragilità*

- Perché si fa? Così per le lavorazioni successive, il materiale è + dolce ed omogeneo (va lavorato perché se no fa schifo*)

- La ricottura di sferoidizzazione o globulizzazione vede il riscaldamento del pezzo alla T di A_1 (T alla quale l'austenite eutettoidica diventa perlite).
Ciò porta a + tenacità.

Tali trattamenti sono costosi perché uso il forno anche in raffreddamento.

② Raffreddamento in aria calda → normalizzazione

- Togliere il pezzo dal forno e lasciarlo raffreddare all'aria.

È un processo più rapido del precedente e come risultato dà una struttura più fine, che però dipende dalle dimensioni del pezzo.

- Generalmente se non si danno specifiche, si è usato questo processo

- Gli acciai autotempranti → sono temprati durante la normalizzazione
hanno molti elementi leganti
sono usati per stampi a vuoto

③ Se vogliamo raffreddamenti ancora + veloci → mezzo raffreddante

Entriamo in stati non rappresentati dal dds

Non abbiamo fenomeni diffusivi, ma non possiamo impedire la trasformazione del Fe da CFC a CCC → C non si muove.

In fatti nella cella CFC ci sono "embrioni" di CCC (vedi grafico dopo).

Questo viene usato per acciai legati.

(24)

Pero' l'olio genera fumi, si incendia, sporca, inquinava e quindi ha costi di smaltimento

- Un altro mezzo raffreddante è il gas (trattamenti in gas)

Serve che tale raffreddamento avvenga in vuoto e in pressione.

Il potere raffreddante è liquido. Non ha tutti i problemi dell'olio, ma costa di +

④ Tempra

- Si riscalda ad una T 50°C superiore a quella alla quale avviene la completa trasformazione in austenite, poi si raffredda rapidamente per ottenere martenite.

Si tenta di evitare la trasformazione eutettoidica per avere martenitica.

Se ritardo l'eutettoidica, posso raffreddare in modo + lento.

- Come faccio?

I grani grossi di austenite mi danno una struttura fragile inutile.

Però aggiungo elementi leganti detti austenitizzanti (stabilizzano l'austenite così che non si trasformi) come C, Ni, Mn (quest'ultimo sempre presente in acciaio

Spesso troviamo anche il Cr, che ha effetto ferrizzante, generando ferrite e destabilizzando l'austenite.

Cr, V, W, ... tendono a formare carburi e quindi hanno maggior affinità con il C che con il Fe. Però per formarli devono diffondere, ma essendo estranei al reticolo, la trasformazione dell'austenite è rallentata. In tal modo il C non ha il tempo di diffondere e viene favorita la trasformazione martenitica.

Però il manganese Mn ha funzione austenitizzante + ferrizzante, il che lo rende perfetto per tale scopo. ne parliamo bene dopo.

- La tempra degli acciai seguita da rinvenimento (si scalda il materiale per ripristinare la diffusività di un elemento presente in micro % nel metallo, affinché si separi dalle matrici in modo fine) viene

fragilità. Ora ne parliamo in dettaglio.

(25)

• Rinvenimento

- Si riscalda il materiale tra i $450 - 600^{\circ}\text{C}$.
(Non riscrive le cose già dette, ne aggiungo solo)
- Il C nelle martensite a queste T precipita e viene espulso sotto forma di carburo, facendo perdere tetragonalità alla cella. Questi carburi sono di tipo χ, ϵ ($\text{Fe}_{2,5}\text{C} - \text{Fe}_{2,6}\text{C}$) che sono metastabili e coerenti.
- Invece a $350 - 400^{\circ}\text{C}$ i carburi tornano dentro e la Fe_3C precipita. Alla fine ho $\text{Fe} - \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$.

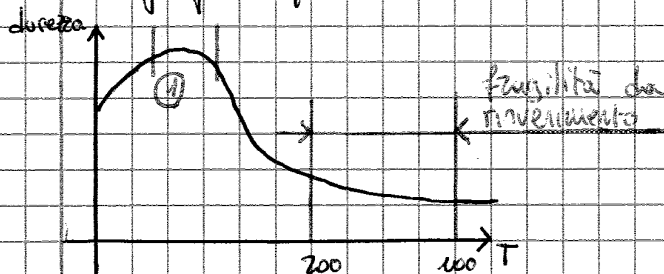
Si ottiene una struttura sferoidale non risolubile (non si vede neanche al microscopio).

- Se ben fatto porta ad elevata durezza e tenacità, ma costa parecchio.
- Fragilità da rinvenimento. Perché avviene? Non si sa di preciso.

Una spiegazione è che i carburi χ ed ϵ vadano a precipitare su una superficie tensionata.

Come la risolvo? Inserisco $0,1 - 0,2\%$ di Molibdeno poiché è un elemento avido di C. I carburi di Molibdeno precipitano a T più alte, quindi la matrice ha il tempo di distendersi.

- Un grafico qualitativo di ciò di cui stiamo parlando:



① aumento dovuto alla trasformazione di austenite residua in martensite



Gli acciai rapidi hanno elementi come Molibdeno o simili e mantengono durezza anche ad alte T (es. punta del trapano)

Prova di Temprabilità Jominy

(26)

- Serve per esaminare il comportamento dell'acciaio in risposta ai trattamenti termici, verificandone in particolare la penetrazione della durezza in profondità.

Si ricavano molte indicazioni sull'attitudine dell'acciaio a subire un trattamento di indurimento [tempra].

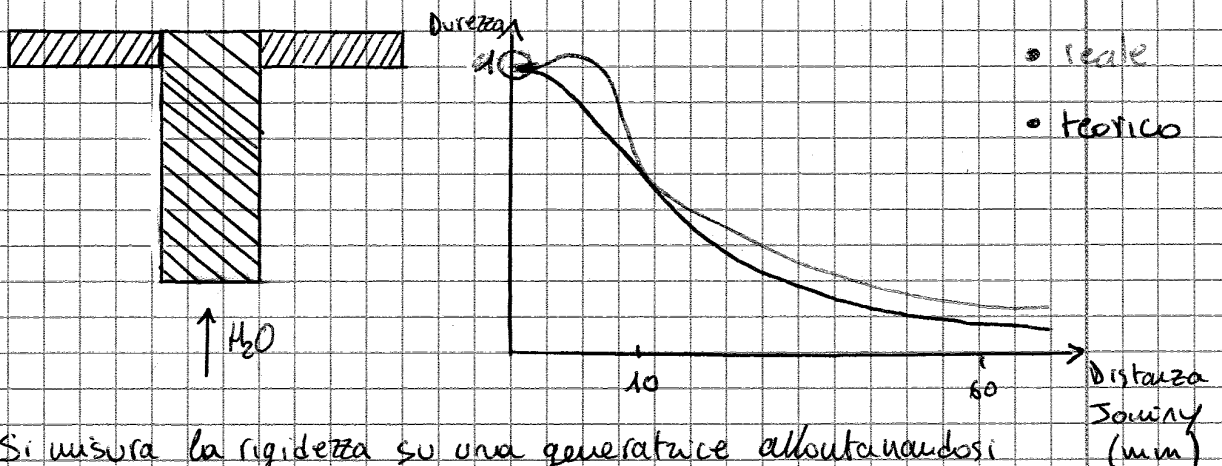
- Diametro critico \rightarrow ϕ barra che a cuore ha 50% martensite
- Diametro critico ideale \rightarrow ϕ barra che a cuore ha 50% martensite ed è raffreddata in modo ideale.

• la prova

Si prende un cilindro di materiale con dimensioni $\left\{ \begin{array}{l} \phi = 25 \text{ mm} \\ \text{lunghezza} = 100 \text{ mm} \end{array} \right.$

Lo si riscalda e poi raffredda [con un getto d'acqua controllato] ad un'estremità (quella opposta a quella a cui è appeso il provino)

Il riscaldamento arriva fino alla T di austenitizzazione.



Si misura la rigidità su una generatrice allontanandosi dalla base temprata

1) Durezza martensite (funzione della % C)

La forma della curva dipende dagli elementi leganti + solo gli elementi leganti, + piatta è la curva.

(27)

- 2000 → leghe strutturali → $\sigma_r \approx 500 \text{ MPa}$
- 3000 → serramenti → no elevate resistenze
- 4000 → ($\sim 13\% \text{ Si}$) elettrodi di saldatura e pistoni [leghe da fusione]
Se aggiungo $0,5\% \text{ Na}$, eutettico spostato al 13% e -15°C (1132°C).
Si chiama eutettico modificato *
- 5000 → $\sigma_r \approx 150-200 \text{ MPa}$ → parti semi strutturali auto
- 6000 → ricopertura → no grinze
[5000, 6000 usati in campo automobilistico]
- 7000 → lega aerospaziale
- 8000 → modulo E maggiore e + resistenza.

* Su serie 4000 si può dire ancora che sono leghe da pressocolata, con getto veloce ma poroso.

Al anodizzato è un alluminio con crescita voluta dello strato di ossido.