



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1409A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Samake

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

ex: prova scritta a domande aperte
W. Nicodemi, Metallurgia I e II

Legge: qualsiasi materiale con caratteristiche metalliche

Argomenti del Corso

- 1. Termodinamica** È necessaria per definire le caratteristiche delle leghe, i costi e i metodi di produzione, i comportamenti dei materiali metallici, i loro "difetti" e perché questi sono utili;
- 2. Caratteristiche dei metalli** Particolarità dei materiali metallici, proprietà in comune con altri materiali e proprietà dei soli metalli;
- 3. Reticoli Cristallini** Quasi tutti i metalli hanno struttura cristallina, studieremo come si origina e che proprietà ha una cella, anche con i Raggi X;
- 4. Fasi Metalliche** solido e liquido e trasformazioni
- 5. Diagramma Fe-C** Peritettico solidificazione e produzione di acciai, Eutettico cerni sulle ghise Eutettoide trattamenti termici;
- 6. Sistemistica degli Acciai** Acciai per bonifica, stampaggio, innovativi, speciali ...;
- 7. Leghe di Alluminio** Leghe da trattamento termico e leghe da fusione.
- 8. Argomenti facoltativi** Trattamenti termochimici superficiali, prove non distruttive, Failure Analysis, meccanica della frattura, Fatica, Saldabilità, Usura.

B A Ogni contributo, di varia natura, può essere racchiuso nel concetto di **Entalpia** H .

Questa Entalpia spiega bene il concetto di energia ma non il concetto di **Disordine**, inteso come grado di ordine del sistema. Questo non è un concetto facile. Si immagina una scatola di Gessetti piena dove i gessetti occupano una precisa posizione e sono fissi. Qualunque orientazione assumerà la scatola quel sistema sarà ordinato per quella direzione. Se ora però si muove la scatola i gessetti si disporranno a caso generando un sistema disordinato. Questo sistema disordinato può però essere visto come la sovrapposizione dei vari sistemi ordinati.

Termodinamicamente un sistema disordinato, inteso come somma di sistemi ordinati, è un sistema che può evolvere in più modi perché ha più configurazioni e quindi è il sistema che ha energia inferiore \Rightarrow Il **Disordine** tende ad abbassare l'energia.

Questo disordine è misurato con l'**Entropia** S , dove ad un'elevata entropia è associato un elevato disordine.

Possiamo a questo punto definire **Energia di Gibbs**

$$G = H - TS$$

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

detta anche **Energia Libera** o **Potenziale di Gibbs-Helmoltz**.

Ogni volta che si va a valutare un fenomeno metallurgico bisogna quindi tenere conto di questo valore dal momento che:

$$\Delta G > 0 \quad \text{Reazione Non Spontanea}$$

$$\Delta G < 0 \quad \text{Reazione Spontanea}$$

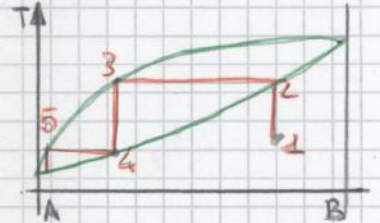
Quest' Energia di Gibbs mi dice quindi se una reazione può avvenire spontaneamente o meno ma non definisce i tempi di reazione.

Questi **Tempi di Reazione** giocano un ruolo fondamentale nei trattamenti termici dove per un tempo di raffreddamento lungo valgono le leggi della termodinamica e della minima energia ma non è così per raffreddamenti rapidi.

161A Ciato ad ogni temperatura e per ogni composizione uno stato che in quelle condizioni è lo stato più stabile quindi a minor energia. Le linee corrispondono alle condizioni di equilibrio, Temperatura per temperatura e si osserva che a pari temperatura il liquido in A' è in equilibrio con il solido in B'.

Questi diagrammi sono alla base di un processo detto

Distillazione Frazionata dove una miscela di composti alla composizione 1 viene scaldata fino al punto 2 dove è in equilibrio con la composizione 3. Allora prendo la miscela in 3 e la raffreddo fino al 4 e procedo così fintanto che non ottengo A puro.



Questo procedimento incontra dei problemi quando si è in presenza di **Azeotropi** ovvero punti dove liquido e solido hanno la stessa composizione.



Abbiamo quindi visto e ricavato la formula dell' **Energia Libera** $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$.

Vediamo ora che effetti ha questa relazione sulla **Produzione dei Materiali Metallici** ovvero delle **leghe**.

Prima però dobbiamo specificare in cosa questi materiali metallici si differenziano dagli altri materiali definendo le

Caratteristiche Metalliche

1. **Conduttività Elettrica** di tipo elettronico;

2. **Conduttività Termica**;

3. **Deformabilità Plastica** questa è una caratteristica fondamentale a livello ingegneristico:
 Mat s def elast poi rompe
 Mat elast poi plast poi rompe
 Infatti da la possibilità ai metalli di essere lavorati e di avere usi che gli altri materiali non hanno;

4. **Lucenza** I Metalli riflettono la luce. Sfruttando questa proprietà si possono studiare le strutture cristalline. Questa proprietà è però apprezzabile solo sotto determinate condizioni [3]

BA Ma allora il secondo sistema (quello a destra) è più disordinato quindi ha maggiore Entropia quindi sarà stabile per elevate temperature. Questo significa che se si porta un ossido metallico ad alte temperature si favorisce la sua dissociazione in Metallo più Ossigeno.

Sperimentalmente si osserva però che in scaldando un metallo in un forno e scaldandolo questo ne uscirà Ossidato. Questo è spiegabile dal fatto che noi abbiamo considerato solo l'aspetto Termodinamico (che ci dice solo se una reazione può avvenire spontaneamente o meno e in che direzione) ma non l'aspetto Cinetico.

La Cinetica infatti ci dice che se ho un Metallo e dell'Ossigeno, all'aumentare della Temperatura aumenta la reattività e quindi è favorita la formazione di Ossido, pur essendo Termodinamicamente sfavorevole, perché avviene più velocemente.

Per rimediare a questo problema devo far sì che l'ossigeno dissociato dal Metallo non reagisca con esso ma con un altro elemento formando un ossido e un metallo puro



Ragionando termodinamicamente allora sarà necessario che a una data Temperatura

$$G_{MeO} > G_{XO} \quad (1)$$

in modo che sia più stabile l'ossido con l'elemento X e quindi si formi quello anziché MeO. Questa è detta **Condizione di Partenza**

Ma allora che caratteristiche deve avere l'elemento X perché sia vera la relazione (1)

- 1 - Deve avere una buona affinità con l'Ossigeno e formare ossidi stabili;
- 2 - Dato che voglio impiegarlo industrialmente deve essere facilmente reperibile e costare poco.

Carbonio

Quindi dovrò garantire che

$$G_{MeO} > \begin{cases} G_{CO} \\ G_{CO_2} \end{cases}$$

Condizione Termodinamica per la Riduzione degli Ossidi Me

15) A Domando le curve di Ossidi metallici, Anidride Carbonica e Monossido di Carbonio si ottiene un

Diagramma di Ellingham-Richardson

Da questo diagramma si vede che l'anidride carbonica e ancora di più il monossido di carbonio hanno un largo impiego in campo industriale pur essendo pericolosi. L'anidride carbonica, che si sviluppa da una combustione con ossigeno in eccesso, può soffocare. Più pericolosa è il monossido di carbonio, che si sviluppa da una combustione con ossigeno limitante, è tossico.

Dal diagramma si nota facilmente, per una data Temperatura, quali reazioni avvengono spontaneamente e quali no ovvero quali hanno un ΔG minore.

Produzione del Rame

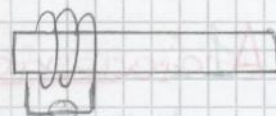
Dal diagramma di Ellingham-Richardson si osserva che l'ossido di Rame ha la ΔG più elevata quindi già a 100°C il monossido di Carbonio ha una ΔG minore. Questo significa che per ridurre dell'ossido di Rame a rame grezzo è sufficiente portarlo a 100°C . Ecco perché fu il primo metallo utilizzato dall'umanità.

Se però è facile ottenere Rame grezzo non è altrettanto facile, e soprattutto più costoso, raffinare il grezzo per ottenere Rame puro che ha scarse caratteristiche meccaniche ma è molto utile in campo elettrico.

La raffinazione può avvenire in due metodi:

1- Fusione per zone

In questo processo una barra di Rame impuro viene scaldata con un solenoide e



? fusa. Una volta fusa completamente se viene fatta solidificare si osserva che l'ultima parte che solidifica è quella contenente le impurezze. Quindi spostando il solenoide fondo il materiale e l'ultima parte non fusa è l'impurità che viene tagliata. 15

Il meccanismo sfruttato in quest'acciaieria è quello di inserire i rottami in un forno dentro il quale sono presenti due elettrodi che, percorsi da corrente, formano un arco che fonde i rottami.

In questo tipo di produzione il problema sta nella qualità dei rottami riciclati, in fatti molto spesso sono presenti altri metalli (per le auto ad esempio sono presenti Rame dai cavi elettrici e Piombo dalle batterie). Questo implica che non potrà produrre nuovo Acciaio solo a partire dai rottami ma dovrà aggiungere a questi dell'Acciaio privo di inquinanti preso dagli scarti della produzione di Acciaio in altoforno. La qualità del rottame diventa quindi rilevante dato che l'Acciaio "pulito" che andrebbe aggiunto costa molto.

In questa tipologia di Acciaierie si è largo uso di Energia Elettrica quindi saranno collocate preferibilmente in montagna dove possono autoalimentarsi con Idroelettrico.

2. Acciaieria a Ciclo Integrale

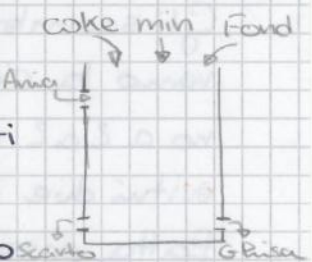
Produce
Cina e
ILVA
[LR]

In questo tipo di Acciaierie anziché partire dai rottami si ricava l'Acciaio a partire dal minerale.

Queste Acciaierie sono disposte in riva al mare poiché devono ricevere elaborare e spedire tonnellate e tonnellate di materiale quindi l'approvvigionamento avviene via nave.

Il minerale viene quindi lavorato e trasformato in Ghisa, ovvero Ferrolegna con $4 \pm 4,3\%$ di Carbonio, e lei poi verrà convertita in Acciaio in un Convertitore, dove si brucia il Carbonio, e successivamente colato dopo aver aggiunto un po di roba.

All'interno di un altoforno vengono inseriti minerali di FeO , Carbone Coke e Fondenti Carbonati. Poi viene aggiunta Ania per trasformare il Carbonio in Monossido di Carbonio. Dall'Altoforno escono CO , CO_2 , gas inerti che non combustano, scarti o loppa (silicati o silicoalluminati che verranno poi usati per fare cementi) e infine la Ghisa.



Oltre agli Ossidi ferrosi la CO riduce il Magnesio e la e la Silicio presenti nel minerale. Oltre a questi avro poi tracce di Fosforo e Zolfo. Quest'ulti- ma va tolto dalla miscela prima che questa vada al convertitore e per farlo viene inserito del Sodio in modo da formare Na₂S che galleg- gia e può essere rimosso.

	600
fino	800°
Ventre	1530°
Sacca	1350° 1600°
Scarti	
Ghisa	

La Ghisa che fuori esce dall'Alto Forno viene quindi trasportata nel Convertitore dove viene trasformata in Acciaio bruciando il Carbonio. Questo avviene dentro pentoloni, rivestiti di materiale refrattario basico, al cui interno viene soffiato dell'Ossigeno puro che brucia il Carbonio, il Fosforo, il Magnesio e il Silicio ma non lo Zolfo (ecco perché va tolto prima).



Quest'operazione dura circa 1 h ovvero finché non inizia a ossidarsi il Ferro. A questo punto per estrarre l'ossigeno che inevitabilmente rimane nel bagno e fletto il Calmaggio ovvero in senso Aluminio, più reattivo del Ferro, il quale si lega all'Ossigeno formando Al₂O₃ che, essen- do più leggero, va in superficie e può essere facilmente tolto. L'Acciaio che esce da quest'operazione viene detto Acciaio Calmato.

A questo punto vengono aggiunti i vari elementi di lega. Dopo aver aggiunto gli elementi di lega si effettua una colata in continua dove il metallo liquido viene fatto passa- re in una serie di rulli in Rotame raffreddati che lo lami- nano. Questo processo crea uno strato di ossido superficiale che viene rimosso facendopassare la lamina in una vasca di Decapaggio dove l'acido toglie l'ossido.

A questo punto si effettua una ulteriore laminazione a freddo seguita da una zincatura.

Quindi l'Acciaio viene avvolto in rulli, oliato e spedito.

ostacolato o vincolato. Questo avviene quando si interrompe il flusso di carica o quando il Conduttore perde la sua caratteristica di conducibilità, ovvero quando il Metallo conduttore da origine a composti non Metallici → Ossidi. Gli ossidi infatti condurranno in forma Ionica ma non Elettronica.

Quindi un conduttore ossidato pur rimanendo compatto perde la sua funzione, il suo scopo.

Il punto debole dei conduttori sono quindi le Giunzioni. Per risolvere questo problema nelle Giunzioni vengono utilizzati materiali che subiscono meno l'Ossidazione → Metalli Nobili.

Qui nasce il Concetto di **Protezione**:

1. L'oggetto non deve venire a contatto con situazioni corrosive;
2. Vanno utilizzati materiali che comunque resistano alle aggressioni esterne.

Questi concetti sono fondamentali per il progetto delle parti anti corrosione (per esempio in un cellulare bisogna evitare che l' H_2O entri e se entra garantire che esca subito, nelle auto invece la lamiera viene Zincata).

Quando si va a progettare un conduttore questo potrebbe essere in Rame come in Oro, che però pesa di più.

Se però bisogna progettare conduttori con grande sezione ovvero quando bisogna trasportare elevate quantità di Energia Elettrica (elevate Potenze $P = V \cdot I$) conviene utilizzare un approccio che sfrutti elevate Tensioni e basse Intensità per limitare le perdite per effetto Joule pari a RI^2 . Ma oltre a tenere basse le correnti è opportuno avere basse Resistenze. Queste sono date dalla relazione

$R = \rho \frac{l}{S}$ dove ρ resistività del materiale, l : lunghezza, S : sezione. Si osserva quindi che è utile sfruttare grandi sezioni per abbassare la Resistenza. Questo però comporta grandi pesi.

Ecco che quindi per ovviare al problema del Peso, nelle grandi distribuzioni, non si usa Rame o Oro ma **Alluminio**

4- Vacanza manca un atomo

5- Vacanza + Autointerstiziale

6- Divacanza

Vacanze

Consideriamo un reticolo, per questioni di entropia gli atomi che sono in superficie possono muoversi di più e aumentare la loro entropia. Allora gli atomi interni, tendendo a un'energia libera minore e quindi a un'Entropia maggiore, tenderanno a muoversi in superficie. Ma se gli atomi si muovono in superficie, allora le vacanze si muoveranno verso l'interno.

Quindi le vacanze nascono dalla tendenza degli atomi ad andare in superficie. Questo processo è però energeticamente sfavorevole poiché bisogna fornire energia per rompere i legami.

Quest'energia è fornita dalle vibrazioni termiche che dipendono dalla Temperatura.

Facciamo quindi un bilancio fra l'energia necessaria a rompere i legami e quella fornita dalle vibrazioni.

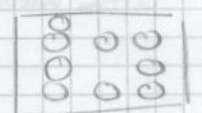
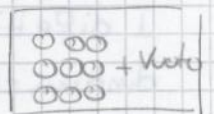
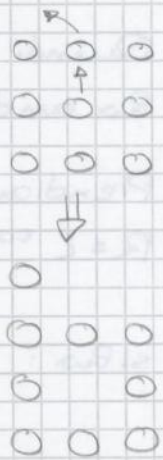
Poniamo n_0 numero di Atomi, n_v numero di vacanze, W_v lavoro necessario per produrre una vacanza ovvero per rompere un legame e muovere l'atomo.

Nel formarsi di una vacanza il sistema vede aumentare la propria Energia Interna di un fattore $n_v \cdot W_v$. Quindi aumenteremo sia l'Entalpia che l'Entropia dato che la presenza di vacanze comporta un maggior disordine.

Varierà inoltre l'Entropia di Miscela S_m che rappresenta la probabilità che il sistema si configuri in un determinato modo ovvero in (reticolo + vuoto), (reticoli e vuoto con vacanze) o nessuno dei due. Questa probabilità è data dall'equazione

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

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



Conducibilità Termica

Gli scambiatori di calore, il cui scambio è influenzato da vari parametri, sono generalmente in metallo poiché questo è un ottimo conduttore termico.

Tuttavia lo scambio di calore è quasi sempre accompagnato da **Fenomeni Corrosivi** ai quali i metalli utilizzati negli scambiatori devono resistere. Verranno quindi sfruttate leghe di **Acciai Inox**, **leghe Cu**, **leghe RePrattamie**.

Quindi lo scambio di calore è associato alla corrosione:

Corrosione Ossidica

Il metallo deve avere la capacità di resistere e proteggersi dall'ossidazione. Per farlo sfruttata **Passivazione** che rende passiva, non attiva, la superficie.

Prendiamo in esempio il Ferro: questo forma tre ossidi diversi con l'Ossigeno: Wustite FeO ; Magnetite Fe_3O_4 ; Ematite Fe_2O_3 . Quindi quando l'Acciaio entra in contatto con l'Aria si possono formare questi tre ossidi che hanno tutti densità diverse e formano (proprio a causa della differente densità) uno strato di coltre ossidata, la Ruggine, che presenta delle porosità. Queste porosità permettono all'aria di penetrare lo strato SO_2 superficiale e quindi di proseguire l'ossidazione.

Per prevenire questo fenomeno uso la passivazione degli Acciai **Inox**. Questi contengono almeno il 13% (18-20 in realtà) di Cr. In questo modo non si formano gli ossidi di Ferro ma gli Spinelli ovvero unioni di un ossido bivalente e uno trivalente. Nel caso dell'Inox si forma $FeO \cdot Cr_2O_3$. Questo è un ossido molto compatto e aderente alla superficie isolando l'Acciaio sottostante dall'Aria.

Un processo analogo si ha per il Titanio e l'Alluminio dove però non è necessario il Cr: formano TiO_2 e Al_2O_3 .

Con questo procedimento isola il metallo e lo protegge. Gli oss di Ti e Al si formano a base 3: sono più stabili.


Relazioni Fra Proprietà Elettriche e Termiche

Le due caratteristiche dei metalli si correlano nella

Saldabilità

Si tratta cioè di portare a fusione due parti separate da giun-
tare, queste cosolidi ficano dando continuità meccanica.

Questo può avvenire anche con l'aggiunta di un terzo materia-
le detto Materiale d'Apporto.

Allora, nel caso in cui è solo il materiale d'Ap- 
porto a fondere si parlerà di Brasatura, mentre se fonde
il Materiale d'Apporto ed una delle due giunzioni si parle-
rà di Saldobrasatura.

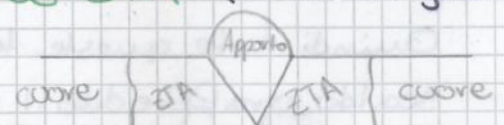
Saldare consiste quindi nel portare a fusione una porzione
limitata di materiale fornendo calore. Questo può essere
fornito con vari metodi: Cannello, Arco, Soule (ovvero
colloco ed due parti e le faccio attraversare da una corrente
che per effetto Soule fonderà il metallo in fondo), ecc.

Prendiamo come esempi Alluminio e Acciaio. Quale è più fa-
cilmente saldabile? Guardando alle temperature di fusione si ha
 $T_f(Aq) \cong 1400^\circ C$ mentre $T_f(Al) = 654^\circ C$ quindi uno subito direbbe
alluminio ma bisogna fare alcune considerazioni.

La Temperatura di Fusione rappresenta il livello termico al quale
rompo i legami. Ma in Acciaio e Alluminio il legami sono sempre
metallici quindi le energie di legame sono simili. Ma allora
poiché $T_f(Al)$ è minore per raggiungere quella temperatura
devo fornire più calore e inoltre l'Alluminio cede molto di più.
Quindi le potenze necessarie per saldare l'Alluminio sono mag-
giori di quelle per l'Acciaio. Quindi per le future saldature
di Alluminio non posso usare macchine x l'Acciaio.

Quando si salda, la zona a fianco della zona di Fusione è
detta Zona Termicamente Alterata ZTA (HAZ in inglese)
ovvero le zone dove il materiale si scal-
da ma senza arrivare a fusione.

Nell'Alluminio però non posso permettermi



1. Il metallo circostante la ZTA è un buon conduttore di calore e quindi dopo la saldatura si raffredda velocemente con elevati gradienti e relative elevate tensioni;
2. Nelle saldature il materiale è vincolato quindi le tensioni nella ZTA sono maggiori perché non si espande a suo piacimento.

La Saldatura è una **Fase Critica!**

Per mediare a queste tensioni posso scaldare il materiale a $300+400^{\circ}$ in modo da diminuire il gradiente. Per il raffreddamento invece posso adoperare lunghi tempi di raffreddamento specie per pezzi grossi che vengono ricoperti con la sabbia.

Le tensioni che nascono a seguito della saldatura non sempre portano a un'immediata rottura. Il pezzo può essere compatto ma una volta messo in opera si rompe.

Per mediare a questo si effettua una **Ricottura di Distensione** ovvero viene scaldato tutto il componente a $110^{\circ}-600^{\circ}C$ per alleviare le tensioni.

Quindi un oggetto molto grande è più difficile da saldare così come un materiale che risponde bene ai trattamenti termici è difficile da saldare perché il materiale è molto propenso a cambiare fase.

In tutto questo gioca un ruolo fondamentale la Chimica. La saldabilità infatti è anche influenzata dalla composizione chimica del Metallo e dalla presenza o meno di inclusionsi.

Materiali ferromagnetici

È un comportamento proprio del Ferro e di alcuni suoi composti e come già detto non dipende dal tipo di legame ma dalla struttura elettronica.

Come già visto l'atomo di Ferro, come quelli dei metalli di transizione, presenta l'orbitale d incompleto. Questi orbitali d sono interni e quindi non partecipano ai legami e non si completano rimanendo spaiati anche dopo la formazione di composti metallici.

Ma allora il moto degli e^- negli orbitali spaiati è sbilanciato perché non c'è l'altro e^- che bilancia.

Considerando il Ferro, gli elettroni spaiati sono 4 e quindi nascono quattro momenti magnetici elementari, uno per orbitale. Questi si sovrappongono parzialmente dando un momento magnetico esterno di 2,6.

Questa per un solo atomo.

All'interno del blocco di materiale ho però 10^{23} atomi e dall'esterno vedo l'effetto di tutti.

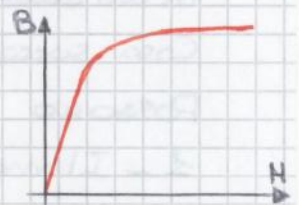
Per studiare il comportamento complessivo bisogna quindi osservare il materiale a livello cristallino.

All'interno del Ferro si osserveranno zone all'interno delle quali gli atomi, o meglio gli ioni, hanno un momento magnetico residuo isorientato: Domini Magnetici.

L'effetto esterno di questi momenti magnetici è nullo perché essendo ogni Dominio orientato diversamente, la risultante esterna è nulla.

Se però immergo il materiale in un Campo Magnetico si osserva un progressivo isorientamento dei Domini nella direzione e nel verso del campo magnetico esterno. In questo modo i Domini magnetici non ostacolano più il Campo Esterno ma anzi lo rafforzano.

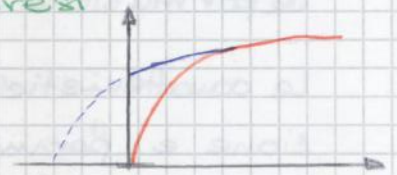
Sul grafico B/H si osserverà che la retta del Ferro magnetici non è retta ma ha un asintoto per la condizione di Saturazione, tutti isorientati.



di **Materiali Magneticamente Duri** - Questo avviene perché isorientando i domini, diminuisce il disordine del sistema e aumenta la G di un tanto pari all'energia fornita dal Campo Magnetico. Una volta tolto il Campo però il sistema torna nella condizione più stabile ovvero a minor energia e maggior disordine quindi si annulla la magnetizzazione.

2 - Se invece, una volta tolto il Campo, il materiale non torna nelle condizioni iniziali, mantenendo una magnetizzazione residua si parlerà di **Materiali Magneticamente Duri** e per annullare il Campo Magnetico bisognerà fornire un contro campo: **Isteresi**

Quindi un magnete dolce andrà più facilmente in saturazione e si smagnetizzerà più facilmente. Sono detti Duri perché il Ferro è poco legato.



Gli Acciai per uso magnetico avranno poco contenuto di Carbonio perché questo, inserendosi negli interstizi, va ad opporsi al moto delle dislocazioni e quindi all'isorientamento. Si inserisce quindi del Silicio (3-4%) e questo va a far fuoriuscire il Carbonio dal reticolo: **Effetto Grafizzante?** Il silicio inoltre è sostituzionale e si oppone meno al moto delle dislocazioni.

Gli Acciai con tanti leganti e in particolare sono più duri e quindi più fragili ma anche più magnetici ?????????? NO

Esistono i **Ferrimagnetici** composti da Domini non isorientati la cui risultante è però non nulla.



Per un non metallo, l'energia che viene fornita serve per produrre nuove superfici rompendo il materiale mentre per un Metallo questa viene usata per deformarlo.

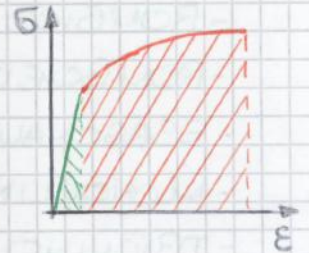
Dalla curva σ/ϵ si osserva che:

1. La deformazione avviene solo se aumento il carico, se non carico, si ferma;
2. La velocità di deformazione è funzione della velocità con cui il carico viene applicato.

Questo significa che è possibile gestire un eventuale possibilità di rottura, interrompendo la sollecitazione.

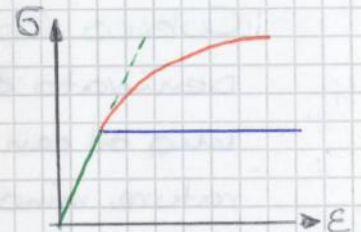
Quindi la maggior sicurezza.

Energicamente si osserva che per deformare elasticamente un metallo sono sufficienti basse energie (area ). Per deformare Plasticamente invece sono necessarie elevate energie (area ).



Questo è fondamentale in quanto dovrà fornire elevate energie per arrivare a rottura. Specie se si tratta di Acciai Innovativi che resistono a grandi σ con elevate ϵ .

In realtà in materiali Metallici subisce una deformazione Elastoplastica e non solo Plastica, quindi quando ho una deformazione "plastica" ho sia deformazione plastica che elastica.



Quindi, per i materiali metallici, dopo un tratto di proporzionalità tra σ e ϵ (e reversibilità elastica) segue un allungamento con deformazione plastica irreversibile e non linearmente proporzionale.

Questo aspetto è molto importante perché permette tutte le lavorazioni per deformazione plastica, impossibili per gli altri materiali: laminazione, estrusione, stampaggio, piegatura, calandratura.

Oltre a queste è sempre possibile fare tutte le altre.

Vediamo ora come si nascono questi reticoli.

Per il Reticolo Cubico Corpo Centrato il discorso è semplice, nasce dalla sovrapposizione, compenetrazione, di due Cubico Semplice, i due reticoli sono uguali e si compenet.

Nel Cubico Facce Centrate bisogna osservare i piani esagonali - Considerando un piano (1,1,1) passante per i tre vertici si osserva che, su questo piano, gli atomi sono disposti secondo una simmetria esagonale.



Allora, a seconda delle posizioni occupate dai vari piani ho configurazione Esagonale compatto se A-B-A, oppure Cubico Facce Centrate se A-B-C-A.

Allora si osserva che il CFC è molto più simile al EC che al CCC. Questo è importante perché si possono facilmente nucleare fasi esagonali da un CFC e si può trasformare un CFC → EC con pesantissime ripercussioni.

Quindi i materiali metallici hanno atomi disposti secondo un reticolo cristallino.

Ma non solo i metalli hanno reticolo cristallino, anche ceramici come il Gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se viene privata delle due molecole di H_2O è un c, solido ionico.

Quando lo deformato si spacca facilmente per le canicle $\begin{matrix} \oplus & \oplus \\ \ominus & \oplus \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \ominus & \oplus \\ \ominus & \oplus \end{matrix}$ e quindi no deformazioni plastiche.

In un metallo generico invece ho ioni metallici positivi in reticolo e e^- liberi. Sotto un carico si spostano i Me^+ e come equilibrio di canicle non cambia nulla ecco perché con questo legame, posso fare deformazione plastica.

Nasce però il problema di definire come avviene la deformazione plastica al livello atomico.

Avviene perché i Materiali Metallici sono Difettosi.

Se si osserva l'energia o la forza di deformazione si ha una differenza fra valori reali e sperimentali. 16

Una distanza reticolare.

Questa è una semplificazione, volendo essere più appropriati bisogna parlare di **Vettore di Burgers** ovvero il vettore necessario per attraversare la circuitazione e chiudere il circuito.

Poiché in linea di massima con una dislocazione manca un semipiano reticolare allora si può dire che il vettore di Burgers coincide con la distanza reticolare e il cristallo si deforma di una distanza reticolare e nasce un semipiano aggiunto.

Le dislocazioni si dividono in **Dislocazioni a Spigolo** dove il vettore di Burgers giace \perp alla dislocazione e giace sul piano di scorrimento determinandolo univocamente; nella **Dislocazione a Vite** invece il vettore di Burgers è parallelo alla dislocazione e ciascun piano contenente sia la dislocazione che il vettore può essere un piano di scorrimento.

Quindi le Vite si possono muovere su più piani mentre le spigolo su uno solo.

Dal punto di vista analitico se vado a studiare l'energia di una dislocazione devo considerare le τ e non σ . Allora la forza per unità di lunghezza e l'energia saranno

$$\frac{1}{2} \tau_0 \cdot l \cdot dr \Rightarrow \frac{1}{2} \tau \cdot b \cdot dr \Rightarrow \int \Rightarrow E = \frac{G b^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{r}{r_0}$$

spigolo
se vite
tolo
(1-\nu)

Si osserva che l'energia è proporzionale al quadrato del vettore di Burgers quindi saranno preferiti i piani di scorrimento con le dislocazioni con minor energia per muoversi ovvero quelle con vettore di Burgers minore.

E poiché in prima approssimazione faccio coincidere il vettore di Burgers con la distanza reticolare sono favoriti i piani di scorrimento con distanza reticolare minore.

Nel **CFC** questi corrispondono ai piani $(1, 1, 1)$ con direzione a maggior impaccamento ~~era~~ lungo le diagonali delle facce $(1, 1, 0)$. Quindi per ogni cella ho 4 piani di scorrimento e ogni piano contiene 3 diagonali

Le due particelle o dislocazioni generatrici rimangono lì e possono generare altre dislocazioni chiuse.

Per una dislocazione a **Vite**, dove le dislocazioni possono muoversi su tutti i piani che contengono la dislocazione e il vettore, se una dislocazione incontra un ostacolo può facilmente cambiare piano e aggirarlo.

Se invece ho una dislocazione a **Spigolo**, queste hanno un solo piano che contenga dislocazione e vettore.

Per cambiare piano di scorrimento una dislocazione incontra una vacanza. Il cambio di piano è favorito a salire da una compressione mentre una trazione fa scendere le vacanze però dipendono dalla temperatura come abbiamo visto \Rightarrow Più temperatura da più vacanze e quindi favorisce la deformazione plastica perché permette una maggior mobilità delle dislocazioni.

Quando due dislocazioni si incontrano sulla dislocazione A si forma un pezzo di dislocazione uguale al vettore di Burger della B e viceversa.

Possono incontrarsi tutti e quattro i tipi di disloc: il più pericoloso è vite-vite perché si inserisce una dislocazione a spigolo che rallenta molto il moto e ecco che quelle a vite, nonostante si possono spostare su più direzioni sono più lente delle spigolo che si spostano solo con le vacanze.

La somma delle due energie delle due dislocazioni che nascono è minore dell'energia che le ha create.

Si ha quindi la dislocazione $b_1 b_2$ che a sua volta genera $b_1 c$ e $c b_2$ e queste due dislocazioni sono dette di **Shockling** o **Parziali**.

Le due dislocazioni $b_1 c$ e $c b_2$ non sono di reticolo e il loro passaggio provoca uno spostamento di atomi e trasformano il reticolo al loro passaggio $CFC \xrightarrow{b_1 c} EC \xrightarrow{c b_2} CFC$. Quindi tra le due dislocazioni ho un pezzo di reticolo EC e le due dislocazioni tendono ad allontanarsi, respingendosi e la zona centrale dove ho EC è detta **difetto di Impiombamento**. A causa di questo difetto l'energia superficiale di quest'area ne determina

I materiali tenaci saranno quelli con un'elevata area sottesa quindi per rompere il materiale bisognerà fornire molta Energia. I materiali fragili invece, con poca area sottesa, e la rottura avviene con poca Energia.

Quando effettuo la prova con P/ΔL per passare a valori assoluti divido per due costanti: in questo modo cambia la scala ma non la forma del grafico.

Allora divido P per A₀ (sezione resistente iniziale) e ot₀ tengo una σ nominale data dal carico istantaneo diviso l'area iniziale. Mentre divido ΔL per L₀ lunghezza iniziale per ottenere la deformazione ε.

In realtà potrei avere σ = P/A dove con A si indica la sezione resistente istantanea ⇒ σ = P/A = (P/A₀) · (A₀/A).

Ma siccome il volume si conserva

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0} = \epsilon + 1 \Rightarrow \sigma_{Real} = \sigma_{nom} (\epsilon + 1)$$

Per l'allungamento posso fare riferimento all'allungamento iniziale o, nel caso reale, all'allungamento dell'istante precedente e l'allungamento finale sarà la somma dei vari allungamenti

$$\frac{\epsilon_{n+1} - \epsilon_n}{\epsilon_n} \Rightarrow \int_{\epsilon_n}^{\epsilon_{n+1}} \frac{d\epsilon}{\epsilon} = \log \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \ln(\epsilon + 1) \quad \epsilon_{Real} = \ln(\epsilon_{nom} + 1)$$

Se considero quindi i σ e ε Reali avrò una curva che cresce fino alla fine e dovrò andare a vedere il valore del carico massimo. Cresce sempre perché considero l'area istantanea e quindi tengo conto della strizione.

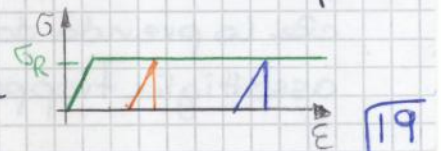
Vale la relazione

$$\sigma_R = K \epsilon^n$$

dove il coefficiente di Incrudimento n è positivo e dà la pendenza del tratto plastico.

Infatti per n=1 ⇒ σ = K ε ⇒ K = E legge Elastica.

Se n=0 ⇒ σ = K cioè il materiale è perfettamente plastico e la componente elastica rimane costante. Questo corrisponde a un comportamento fragile perché se supero la σ di deformazione plastica il provino si rompe subito.



Il coefficiente di Anisotropia va a misurare la deformazione $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ lungo larghezza e spessore e questi devono essere diversi.

Allora per un R_p basso si usa un grano grosso e poco Carbonio. Le leghe per stampaggio e per alte Temperature sono le uniche che vogliono il grano grosso in modo da favorire il moto dislocativo. "Un grano ^{piccolo} è più difficile da muovere e ostacola lo scorrimento", le leghe per alte T hanno precipitati a bordo grano per ostacolare il moto.


Per ottenere l'Anisotropia, durante la colata, quando faccio la nicotina, i Nitru^{ati} di Alluminio precipitano sui piani (111) nel senso dello spessore e ne inibiscono la crescita impedendo al materiale di deformarsi in quel verso.

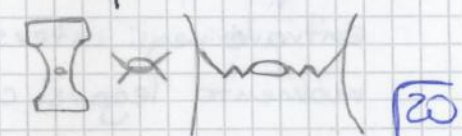
Quindi controllando i precipitati controllo l'Anisotropia. Occchio che deve precipitare con la lamina a freddo, non a caldo.

Frattura

Un materiale metallico deve essere Resistente e Tenace, per la Tenacità servono K_{IC} (elastico) e S_{IC} (plastico). La rottura dipende dal materiale e dal tipo di sollecitazione. Influenzano anche la Temperatura e la velocità di applicazione del carico.

Posso quindi definire Frattura **Duttile** con deformazione plastica o **Fragile intergranulare** se la cricca passa fra i grani o **transgranulare** se lo attraversa.

 La più semplice è **Frattura Duttile su Monocristallo** dove se attivo un piano di scorrimento ho frattura a 45° mentre se attivo più piani ho strizione con rottura a spigolo.

Per i metalli **Policristallini Duttile**, la frattura è a **Coppa e Cono** dove al centro del campione si crea una fessura a causa delle inclusioni o delle seconde fasi. Si scollano matrice e particella e nasce una fessura perpendicolare al carico. Tuttavia lo sforzo di Taglio è massimo a 45° quindi si creano bande di scollamento a 45° lungo le quali la frattura si propaga a zig-zag 

relativo aumento di volume e quindi nascita di crepe interne. L'Idrogeno mano entra nel reticolo durante il processo galvanico e per rimuoverlo si lascia il pezzo a 184° per totore in funz. della grandezza del pezzo.

In fine sulla frattura influisce anche il grado di inamidamento della matrice: maggiore è il grado di inamidamento, maggiore è la resistenza della matrice.

Se ora andiamo invece a considerare la **Frattura Fragile**, questa si ha per cristalli EC o CCC, temperature basse, e energie limitate.

Il fatto che avvenga a Temperature basse significa che le dislocazioni sono ferme e quindi basta poca energia.

Considerando il CCC, questo ha piano di scorrimento lungo la diagonale del cubo. Allora con una sollecitazione diretta lungo una faccia le dislocazioni sono ferme e si ha rottura per basso sforzo.

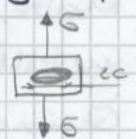
Questo non avviene nel CFC perché ha più piani di scorrimento.

Fare una frattura significa creare nuove superfici sfruttando l'energia che, per i fragili, è elastica e vale $G_T = \sqrt{\frac{\gamma E'}{a}}$ dove a è la distanza interatomica. I valori

ottenuti da formula sono molto diversi da quelli reali: 18000 MPa teorici contro 280 MPa pratici a -185°C.

La differenza è data dalla possibile presenza di difetti nel materiale come fessure con sforzi concentrati agli apici


$$G_{estremità} = 2G \left(\frac{c}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad G_R = \left(\frac{\gamma E E'}{4ca} \right)^{\frac{1}{2}}$$



Quindi tanto ρ è piccolo, tanto G_R è bassa e viceversa con $c \Rightarrow$ Al crescere della cricca diminuisce G_R . Queste cricche possono essere già presenti all'interno del materiale o nascere per i moti dislocativi che formano fessura se manca il semipiano aggiunto o se due dislocazioni si incontrano.

Una volta formata la frattura si propaga per energia superficiale cinetica e deformazione plastica: se all'apice della cricca ho deformazione plastica, la propagazione si ferma.

con Alcool Dietilico - Fatto questo è perfettamente lucido
 A questo punto si procede con l'osservazione metallografica
 con microscopio ottico a 500x dove la luce viene fatta inci-
 dere direttamente sul campione.

Allora se il campione è perfetto e ideale si osserva un cerchio
 bianco - Ma se ho Ossidi o Solfuri vedo delle stanghette e
 se è Ghisa, la grafite è come  - Una cricca sarà
 un punto nero ● -

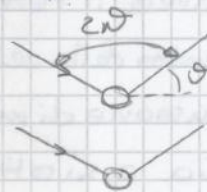
A questo punto è possibile attaccare il provino con una
 soluzione debolmente corrosiva di Nitral (1% di HNO₃ in
 Alcool Etílico) - Si usa una soluzione debole perché così
 corrode selettivamente solo le zone a maggior energia
 ovvero i bordi grano e zone bifasiche, che dopo la corro-
 sione non riflettono più e sono visibili.

Esistono poi microscopi elettronici dove un fascio di e⁻ viene
 riflesso dal componente: funziona solo per metalli - Questo
 non necessita di una superficie piana e quindi è molto
 utile per indagare sulle superfici di frattura irregolari -
 Arriva fino a 10000x ma non viene usato per vedere di più
 ma per le sup irregolari -

Questo permette anche un'analisi chimica puntuale con
 i Raggi X e quindi studiare la diffrazione da cui ricavo
 la λ e riflessa e posso risalire al materiale.

Prende il nome di **Microsonda EDS** se legge l'Energia oppure
WDS se legge λ dei Rx emessi -

I Raggi -x vengono anche usati per venire ricavare macroscopica-
 mente fratture interne o la distanza reticolare
 sfruttando i reticoli e usandoli come reticoli di diffra-
 zione ($n\lambda = 2d \sin \theta$). Ricavo quindi lo spettro di dif-
 frazione e ogni sostanza ha il suo -



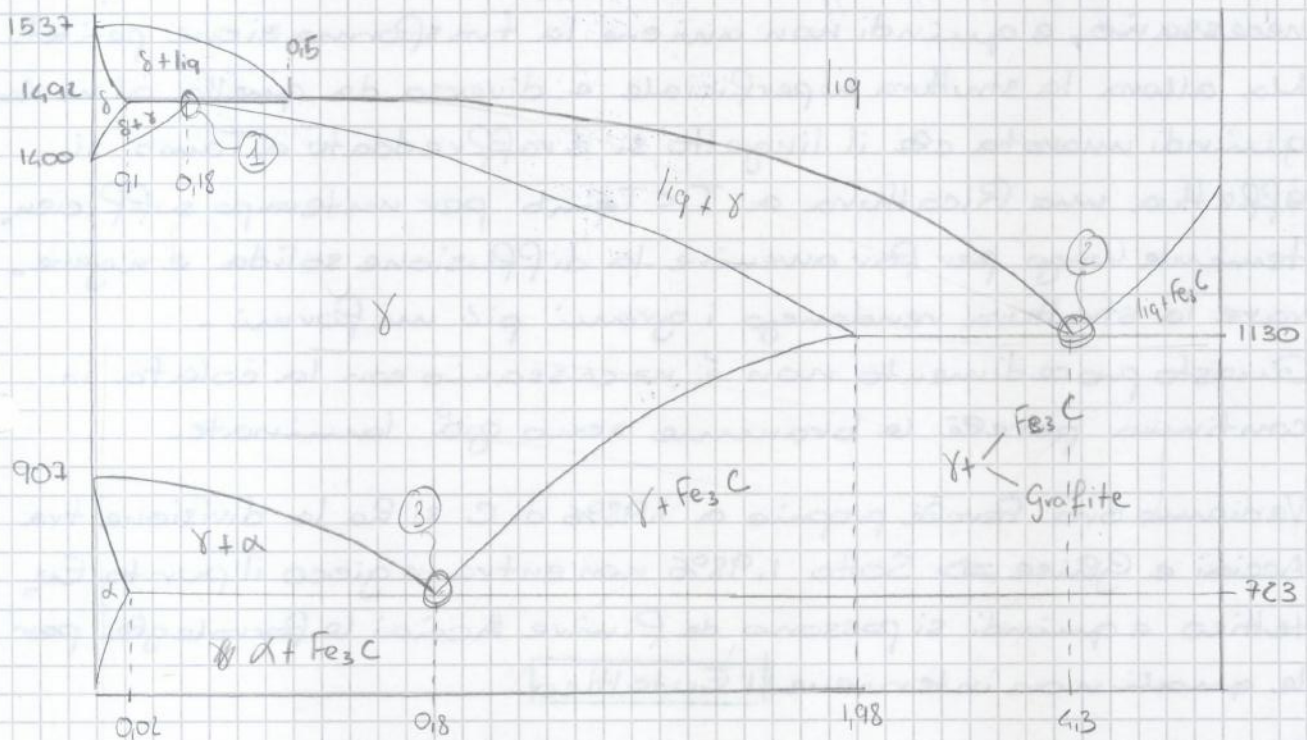
Sostituendo i valori di a per le due celle si ottiene che per la CCC lo spazio disponibile è $2,83 \text{ \AA}$ mentre per la CFC è $3,6 \text{ \AA}$.
 Ma per questi valori l'unico atomo che potrebbe entrarci è H, infatti l'atomo di Carbonio è più grosso e non ci dovrebbe entrare. Per farlo forza il reticolo e forzandolo va a limitare la quantità che c'è ne può stare: ne entra poco ma quel poco basta a cambiare di molto le caratteristiche.

Nel CFC ne entrerà di più con massima solubilità pari a $1,98\%$ a 1130° mentre nel CCC ne entra al massimo $0,02\%$ a 723°C . Sopra il 1400°C la CCC con massima solubilità $0,1\%$ a 1492°C perché la cella elementare si è dilatata per la temperatura.

Date le tre diverse solubilità mi aspetterò tre diverse soluzioni solide: \rightarrow CCC, bassa T \Rightarrow Ferrite α

\rightarrow CFC \Rightarrow Austenite γ

\rightarrow CCC, alta T \Rightarrow Ferrite δ



Questo è il **Diagramma Fe-C**.

Oltre 1,98% posso avere γ più uno o l'altro.

La cementite è un composto con 6,66% C.

Si individuano 3 punti notevoli: \rightarrow 1 peritettico

\rightarrow 2 eutettico

\rightarrow 3 eutettoide.

Al 4,3% si hanno le **Ghise** che sono materiali da Getto, la cui caratteristica principale è la solidificazione quindi si cola in stampi e le lavorazioni successive sono limitate.

La Ghisa ha alcune caratteristiche. La composizione dovrebbe essere più vicina possibile all'eutettico perché il punto con liquido a Temperatura minore che genera due fasi. Infatti quando colata è importante che il materiale solidifichi alla Temp minore possibile. Quindi lavoro intorno alla C_e nel cui intervallo non ho fasi dove coesistono liquido e solido \Rightarrow Intervallo di Solidificazione.

Questo $\times K$ quando coesistono fasi solide e liquide durante la colata posso avere problemi anemipire lo stampo.

D'altra parte però una Ghisa Eutettica al 4,3% ^{troppo C} non ha proprietà meccaniche, mentre una ghisa subito sopra il 1,98% si cola molto male e non funziona meccanicamente perché si formano grossi cristalli di Austenite γ sul bordo dei quali ho precipitati di Fe_3C e Grafite che indebolisce molto la struttura.

Per risolvere questo problema si aggiunge il **Silicio** che è SEMPRE presente nelle Ghise. Il Silicio infatti ha un elevato potere grafitizzante ovvero aumenta l'attività del Carbonio e quindi è come se avessi più carbonio (ogni 3% di Si è come se avessi 1% di C in più). Ma allora una lega con 3% di C e 3% di Si (che è come 1% di C) si comporta come se avesse il 4% di C e quindi prossima all'eutettico avendo però solo il 3% di C. Quindi riuscirò a colare bene e a non avere troppo C che invalida le proprietà meccaniche.

Per le Ghise ho anche **Inoculazione**: all'atto della colata aggiungo localmente 0,1% di Silicio in modo da mi formare le lamelle di grafite che si formano.

Se poi aggiungo **Magnesio** al 0,1% di Grafite non solidifica più in lamelle ma in sferoidi \Rightarrow Grafite sferoidale. Questa è migliore perché le lamelle inducono un fattore di intaglio 13 mentre le sfere un fattore 3.

Quindi la trasformazione eutettoidica $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$ è governata dalla Temperatura e dal tempo che determinano:

1. Nucleazione di nuove Fasi

Dipende dalla spinta termodinamica che ha il sistema durante la trasformazione: tanto più sto lontano da $723^\circ C$ tanto più il sistema tende a formare nuclei di α e Fe_3C , mentre se sono vicino a 723° la nucleazione è bassa.

2. Crescita dei Nuclei

Questa è pesantemente influenzata dalla diffusività perché richiede nuovo materiale \Rightarrow se raffreddo, diminuisce la diffusività e quindi la disponibilità di nuovo materiale con legge

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

Trattamenti Termici

Al fine di affinare la struttura è possibile effettuare i Trattamenti Termici *che si riscaldano il materiale*

Si riscalda il materiale in campo Austenitico e poi lo si raffredda - B

Bisogna scaldare lentamente per evitare bruschi shock termici e non troppo da entrare in fase liquida - Devo inoltre evitare che si formi il grano austenitico che se è troppo grosso può dare problemi e far nascere delle cricche.

Possono poi nascere problemi di Ossidazione Superficiale del pezzo: allora devo distinguere tra trattamento termico del Grezzo o del Pezzo Finito.

Se effettuo il trattamento termico sul GREZZO dopo averò tutte le lavorazioni che asporteranno lo strato di Ossido e quindi mi dovrò solo preoccupare di prevedere un giusto sovrametallo.

Se invece effettuo la lavorazione sul Pezzo Finito ^{+tratt term} è

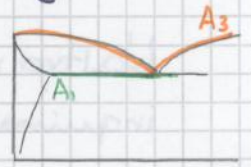
① opportuno proteggere la superficie con gas protettivi (N, He, Ar) che però sono estratti dall'Ania e contengono l'inquinante O_2 che va distillato ma questo è un procedimento costoso.

② Più economico è avere atmosfera prodotte in loco ovvero facendo avvenire la reazione $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ ma con O_2 limitante formando $CO + H_2$ fornendo

Raffreddamento

Ricottura Completa

Raffreddamento molto lento che crea una struttura grossolana. Porto il materiale a 50°C sopra la curva A_3 e poi raffreddo in Forno. Doppo ottengo una struttura grossolana che annulla tutti i precedenti trattamenti. È una struttura poco Dura e fragile ideale per il lavoro alle macchine utensili.



Se riscaldo tra le curve A_3 e A_1 allora ho Ricottura di Globulizzazione dove il cristallo assume una forma più tondeggiante.

Normalizzazione

Con questo trattamento uso il forno solo per scaldare quindi è il meno costoso quindi viene fatto se non è richiesto un altro. Il tempo di raffreddamento dipende dalle dimensioni del pezzo: più il pezzo è grosso più la normalizzazione sarà simile alla ricottura cioè lenta mentre se il pezzo è piccolo sarà veloce (tempra). In genere la Normalizzazione da cristalli più fini della Ricottura.

Se voglio aumentare ancora la velocità di di raffreddamento allora dovrò usare dei mezzi.

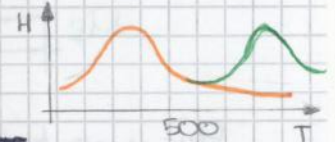
Uno può essere l'Acqua che sempre sarebbe il più economico ma ha un problema: raffredda molto velocemente a basse T e lentamente a alte temperature.

Un pezzo in candescenza, immerso in H_2O la fa evaporare e il pezzo viene circondato da una guaina di vapore che scambia molto poco calore rallentando il raffreddamento (Calefazione) e attivando la reazione $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, cosa che voglio evitare o attivare alla Temperatura minore possibile. Quando poi invece il pezzo è a bassa temperatura le molecole di H_2O entrano nella guaina di vapore e entrano in contatto con la superficie calda evaporando e sottraendo molto calore. Questo è un ulteriore problema perché può portare ad elevati ΔT tra cuore e superficie con conseguente frattura.

Quindi l'Acqua viene usata per gli Acciai al solo Carbonio.

allora parlerai di distensione.)

Con questo procedimento, l'austenite residua si trasforma in ferrite, la martensite ~~per~~ ^{perde} Carbonio e si formano i carboni X e E: questi formano Martensite Tetragonale ovvero martensite Cubica + X e E ($Fe_{2.6}C$ non di equilibrio).
 Questi carboni sono coerenti perché la durezza cresce con la Temp.
 Se poi aumento ancora la temperatura i Carboni si indisciolgono e precipita Fe_3C , quindi alla fine ho di nuovo $\alpha + Fe_3C$ che però ora ha una struttura molto fine e sferoidale con un'elevata resistenza meccanica e tenacità.



Se ho Acciai legati le cose cambiano perché intorno a 500°C possono precipitare i carboni degli elementi leganti (curva -) e si ha Indurimento Secondario.

Con il Rinvenimento può nascere un fenomeno pericoloso: Fragilità da Rinvenimento da 250° a 400°C la tenacità diminuisce forse a causa dei precipitati di X e E su una matrice che è ancora tensionata. Per contrastare questo fenomeno metto 0,2-0,25% di Molibdeno che con un'elevata affinità con il Carbonio tende a precipitare lui ma lo fa a T maggiori, quando la matrice è più distesa.

Curve TTT

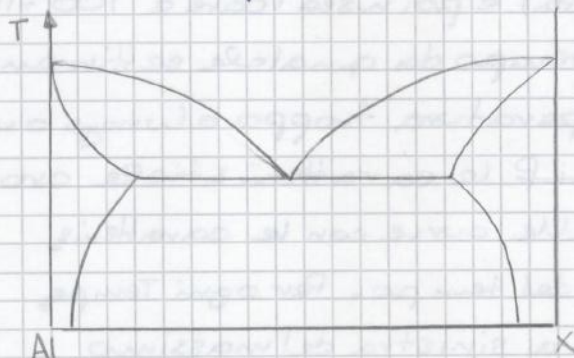
Pensando ~~alle~~ alla trasformazione martensitica che come visto dipende dalla Temperatura e dal Tempo è possibile tracciare dei diagrammi dove $T = f(t)$ indicando il tempo in cui la reazione inizia e quello in cui finisce temperatura per temperatura. Quando i vari punti ottengo due curve di inizio e fine trasformazione.

Alle basse Temperature posso individuare i punti di martensite start M_s e martensite finish M_f .

Il grafico dice l'andamento della trasformazione in T e t .
 Ogni Acciaio ha la sua Curva.

Alluminio

Nelle leghe di Alluminio si verifica un fenomeno analogo alla formazione di Acciaio Austenitico quando lego Al con Cu, Mg, Li, Si o Zn. La miscibilità allo stato solido diminuisce con l'aumentare della Temperatura.



Nelle leghe di Alluminio scaldare il più vicino possibile alla Temperatura Eutettica ($500^{\circ} + 550^{\circ}C$) senza superarla.

Poi posso raffreddare in Acqua perché le temperature sono minime e ho un basso rischio di rottura.

Si formerà una soluzione solida di Alluminio e un composto X. Se ho Alluminio e Rame la soluzione solida è $Al_2Cu + Al$ ma se raffreddo velocemente limito la diffusione e formo una soluzione di Alluminio sovrassaturata di Rame.

Questa soluzione però non è in condizioni di Equilibrio.

Allora devo procedere con un **Invecchiamento Naturale**. Dopo aver Temprato, le caratteristiche meccaniche (σ_R e HV) sono molto basse. Con l'Invecchiamento le posso migliorare.

Prendo ad esempio una lega Al-Cu (serie 2000) dove ho Rame statisticamente distribuito su tutto il reticolo.

Con un Invecchiamento di qualche settimana il Rame si riunisce in Cluster, ovvero si raggruppa e nel farlo, distorce il reticolo formando composti metastabili non di Equilibrio che non vedo sul DdS. e che sono Coerenti: hanno interfaccia comune con quella della matrice e similè sistemi di scorrimento delle dislocazioni quindi le dislocazioni fanno ^{meno} fatica ad attraversarli: maggior potere rafforzante.

Rafforzando porto $\sigma_R = 70 MPa \Rightarrow 500 MPa$

Dura Alluminio