



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2423A

ANNO: 2019

A P P U N T I

STUDENTE: Caggese Sofia

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.**

(1)

Leghe materiale con caratteristiche meccaniche

- fatti da 2 o più metalli: bronzi, ottoni, alcune leghe di Alluminio (serie 2000, Al+Cu)
- metallo e non metallo: alluminio 5000 (Si, e, o + Al)
alluminio 7000 (Al + Zn)

La lega può essere però un NON METALLO pur avendo caratteristiche metalliche **leghe metalliche**

Fe C $\left\{ \begin{array}{l} \text{acciaio} \\ \text{ghisa} \end{array} \right\}$ Ferroleghe

Non è sempre così però, può anche avere cose che NON sono leghe come:

Fe O \rightarrow Ossidi $\left. \begin{array}{l} \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ ematite} \\ \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ magnetite} \\ \text{FeO} \text{ wustite} \end{array} \right\}$ non hanno caratteristiche metalliche

Caratteristiche metalliche

sono caratteristiche specifiche di materiali metallici (dipendono dal legame metallico)

- Conduttività elettrica
 - Conduttività termica
 - Lucentezza
 - Proprietà magnetiche (NON dipendono dal legame)
- } comuni a tutti i metalli
- } sfruttata in ambito analitico

(La maggior parte delle superfici dei materiali metallici NON ha lucentezza, perché NON è di materiali metallici (coperto di ossido)
Suole deve essere perfettamente piana altrimenti non ha riflessione)

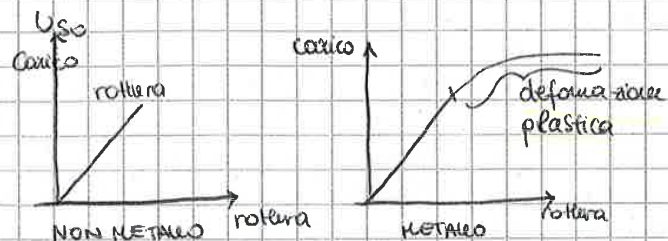
\rightarrow ferromagnetismo (incremento \vec{B})
 \rightarrow paramagnetismo (non cambia \vec{B})

dipende dal metallo ed è condizionato dalla temperatura
 \downarrow
(ex ferro superata la 768°C diventa paramagnetico)

- Saldabilità - (materiali da getto \rightarrow ghisa)
- End of life (reciclabilità) (come ai vetri) \rightarrow NON È RIUTILIZATO
- Deformabilità plastica (proprietà principale)

I metalli sono **professi** **prelavorati** (più comuni configurazioni geometriche reticoli cristallini)
Nel caso Fe ha 2 configurazioni a cubo: cubo centrato
face centrate
 \downarrow
permette:

Fabbricazione: Stampaggio a caldo/freddo
Laminazione
estrusione
trafilatura
Cottura



Capacità da parte dei materiali metallici di assorbire energia (utili elastici)

15.10.2018

Tungsteno resiste ad alta temperatura

3

in ambito elettrico:

• Rame poco costoso, costoso se puro

Cu

• Oro e Platino problematicità: non hanno resistenza meccanica
 (metalli preziosi) proprietà: non si ossida (velocità ossidazione molto lenta)

Metalli conducono bene la corrente : legame metallico
 Ossidi non conducono : legame ionico] → se un legame è ossidato la corrente non passa.

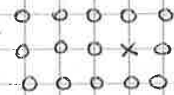
Il danno provocato da una rottura di un apparecchio è → del loro costo effettivo → PREVENZIONE dalle

elettricità per trasmettere potenza elettrica $P = VI$
 essendo reali RI caduta potenziale + effetto Joule
 $RI \cdot I = RI^2$ dissipazione termica

le giunzioni sono perciò in ORO o PLATINO

quindi conviene limitare la resistenza

Ohm: $R = \rho \frac{l}{S}$ $\rho = f(\text{materiale, temperatura})$



con l'aumentare di T aumenta la presenza di Vacanze
 materiali cristallini: compaiono geometrie precise e ripetute.

Vacanze: difetti ma indispensabili → diminuisce l'energia del sistema, aumenta la stabilità di equilibrio TERMODINAMICAMENTE preferito

Ad ogni T ho un certo numero di vacanze → minima energia
 Q = energia necessaria a formare una mole di vacanze

$$\frac{n_v}{n_T} = e^{-\frac{Q}{RT}}$$

↑ T = vacanze + atomi

Le vacanze cambiano il campo energetico e l'elettrone non può passarci, interrompono quindi il percorso

n_v = numero vacanze si misura elettricamente

↳ con l'aumentare → fenomeni di autocombustione

aspetto geometrico può diminuire R → sezioni maggiori → aumento di peso ⇒ materiali con peso specifico basso

• Alluminio

la perdita di peso conduce più del Cu

("VACUO")

CONDUCEBILITÀ TERMICA

CORROSIONE

- 1) a secco : fenomeni ossidativi
- 2) a umido : fenomeni elettrolitici

OSSIDAZIONE (solitamente in assenza di H_2O , ad alte T)
 (solitamente in presenza di H_2O , a basse T)



proprietà simili: spessori extra sottili; avvolgono il materiale e creano una barriera sigillata all' O_2 ⇒ PASSIVANTE



NON SONO PASSIVANTI

acciai inossidabili
 18 x 8 x pale tubiera

con unione chimiche diverse

↳ crescendo: strato non compatto e poroso → RUGGINE che non isola il materiale base (Fe) e O_2 continua l'ossidazione

Titanio, Vanadio e Niobio (% basse) maggiore affinità con C rispetto al Cr e così NON ingrossa la matrice e non si corrode più facilmente

L'ideale sarebbe avere una fase sola

Cromo elemento ferritizzante che tende a stabilizzare e rafforzare Ferrite α (CCF)

1° categoria

Acciai Ferritici (CCF): il cromo sostituisce il ferro molto facilmente e quindi ci può essere anche in percentuali di 20% ÷ 40%.
vantaggi { ma NON a basse temperature (sotto 0° zero)
sensibilizzazione (tra 600 + 650 °C precipitano i carboni → corrosione)
o si forma la fase σ (50% Fe 50% Cr))

resistone bene alla STRESS CORROSION

2°

Acciai Austenitici (CFC)

Ferrite γ o austenite

Carbonio è austenitizzante ma NON è la scelta migliore si utilizza quindi il NICKEL: 18% Cr e 8% Ni → austenite a rimb
costoso ↓
ora: 20% Cr 10% Ni → composizione limite

AUSTENITE: composizione solida del ferro con CFC sono i migliori
meno costosi → usati dove indispensabile
ottima resistenza alla corrosione a qualsiasi T (alte o basse) grazie alla struttura CFC
anche qui "spemello" $(FeNi)O \cdot (FeCr)_2O_3$

vantaggi: { sensibilizzazione ~ 600 °C: precipitazione carboni
pitting (buchetti) in ambienti clorurati
non resistono alla stress corrosion (corrosione sottosfessato)

3°

Acciai Duplex

acciai costituiti da bifase austeno-ferritici

perdiamo in corrosione ma guadagniamo in stress corrosion
si parte da un acciaio austenitico, se metto il 5% di Nickel invece del 10% ottengo la ferrite
e così ho sia ferrite sia austenite

18% Cr 10% Ni

sono fatti di acciai con alto tenore di C (0,2%) per avere la durezza e cromo (18%) per la corrosione e Nickel per il raffreddamento veloce

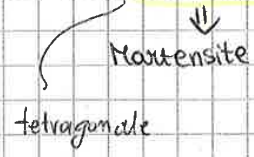
Acciai autordici

(durezza da II GH) x sostituire il Nickel: Manganese Azoto
costo minore

Acciai Martensitici (usati x eseme)

durezza tenere Cr elevato 15% ÷ 18%

si forza il sistema → MARTENSITE (che non è una fase di equilibrio)
resistenza corrosione minore
solubilità carbonio 1200° C 2% (non c'è cementite)
se raffreddo lentamente il C ha il tempo → carboni e cementite da CFC → CCC γ
velocemente CFC → CCC ma il carbonio RIMANE → TCC ricca di C



= solida sovrassatura di carbonio, non in equilibrio
estremamente distorta e dura

CFC (acciai austenitici) essendo con struttura deformabile, assorbe le tensioni → NON HA ROTTURA

CCC non si deforma così facilmente → HO ROTTURA

L'effetto $H+H \rightarrow H_2$ si manifesta SOLO se acciaio ha resistenza $> 900 \text{ MPa}$ a $T = \text{ambiente}$
 oltre 900 MPa è resistente ma rigido, se sollecitato dall'interno lo spacca → INFRAGGIUNTO DA H

però acciai facilmente deformabili → facile stampabilità, poco resistenti
 non erano soggetti da infragimento di H (al di sopra dei 900 MPa)

ora } acciai economici con elevate resistenze ($> 1000 \text{ MPa} - 2000 \text{ MPa}$) Dual phases (DP) ferritico-martensitico
 } TRIP (inizialmente austenitici + def. meccanica → martensitici), microlegati (quantità ridotte di Ti, Nb, V)
 } per dare coerenza e impediscono l'ingrossamento dei grani che rimane piccole e
 } aumentano le caratteristiche meccaniche

HSLA High strength low alloy "alto resistenziali microlegati"

H: entra nel materiale, si posiziona a bordo di grano → trappole di idrogeno
 unica possibilità è individuare il momento in cui l'H darebbe edrare
 se processo galvanico H entra subito, saldatura, tutti i processi termici o con umidità, decapaggio
 ... entra MOLTO FACILMENTE

quando si manifesta troppo tardi → rottura in differita
 finché H è non ancora può facilmente fuoriuscire

DEIDROGENAZIONE

scaldando il materiale subito dopo il sospetto che sia introdotto H
 scaldare $180^\circ + 200^\circ \text{ C}$ (al di sopra potrebbe alterare le caratteristiche)
 per 48h (ambiente aerospaziale) molto inferiori da 4÷12h (per gli altri
 ambienti) ma non è sufficiente
 ideale almeno 24h
 per grandi dimensioni (LINGOTTO) $\sim 600^\circ \text{ C}$ $\Delta t = 1 \text{ settimana}$

... Zinatura elettrolitica: lo strato di zinco depositato $5 \div 10 \text{ micron}$ troppo sottile per
 proteggere si corroderebbe subito; va passivato (protetto) prima
 con il CRONO (cromo esavalente) (colore giallo) ? cancerogeno
 poi CRONO3 (cromo trivalente)
 oggi ossido di cromo(III) (con silicio) (SHI) SILANO

Preverniciato o zinco metal deposizioni veloci ad altissimo contenuto di Zn
 utile per la successiva verniciatura
 ma con Zn NON POTEVA SACRIFICARSI

utili purché INTEGRALI (basta anche un piccolo taglio o graffio per rovinare tutto!)

29.10.2018

9



non è la zona più critica ma solitamente se si spacca sono errori di procedura

ZTA (o HAZ)

zona termicamente alterata: zona adiacente alla zona fusa ed è la più critica

(cuore o bulk interessata marginalmente dai effetti termici)

non si arriva a temperatura di fusione, ma grazie alla conduzione, è fortemente scaldata → TRATTAMENTO TERMICO

operazioni di riscaldamento ad una T e raffreddamento (o - veloce a seconda dell'obiettivo) nascono per ciò se criticata → si esasperano le conseguenze perché il componente NON è libero di muoversi (come in un qualsiasi classico trattamento)

SCALDO

Quando scaldo la parte più vicina si scalda per prima → gradiente tra cuore - esterno
Dilatazione delle superficie ma il cuore freddo si oppone → cuore in TRAZIONE
superficie COMPRESSIONE

NB ROTURA SOLO PER TRAZIONE (tensioni che nascono per temperatura o variazioni di fase)

Quando si scaldano anche il cuore è la superficie ad opporsi → cuore in COMPRESSIONE
superficie in trazione

Maggiore v di riscaldamento, maggiore dimensione → maggiore tensioni → si può spaccare anche solo riscaldando

Devo ridurre il gradiente termico
Scaldo, lascio Tramburare, scaldo ecc... in più step intermedi
x limitare i gradienti → "GRADINI di OMOGENEIZZAZIONE"
in genere che con la saldatura non ho

come riscaldando a scala, graduale

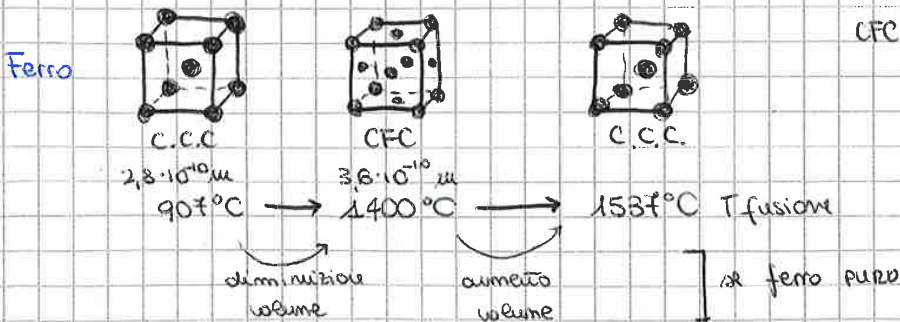
⇒ Rotura per: incollaggio, segregazioni, ossidi di ... TRAZIONE nella ZTA
A RAFFREDDAMENTO parte esterna fredda → contrazione impedita dal cuore caldo → TRAZIONE
poi anche cuore freddo → trazione e superficie in compressione

Più veloce è, maggiore rischio di ΔT → maggiore tensioni

Fin qui solo trazione fisica

poco deformabile e facilmente spaccarsi
CRITICO
(zona tensionata)

Chimicamente avvengono TRASFORMAZIONE DI FASE:



CFC più compatta → meno volume

Ma: Carbonio mi aumenta il campo di estensione della fase di CFC (C è austenitizzante)

Ferite α → Ferite γ AUSTENITE → Ferite δ

Ferite β ($768^\circ C$) essendo paramagnetica sopra la T di Curie

2) il carbonio deve passare dall'austenite
nella cementite $C_\gamma \rightarrow Fe_3C$

passaggio lento grazie a fenomeni
di diffusione: il carbonio deve diffondersi fuori
dal reticolo, raggrupparsi, generare nuclei di
cementite e farli crescere

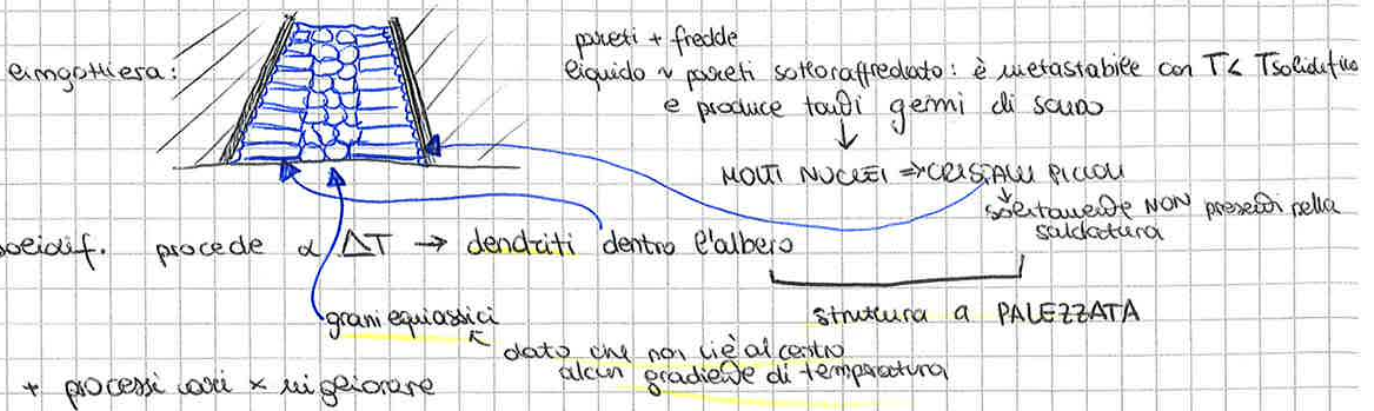
Richiede tempo

Nella saldatura è raffreddata velocemente
e il carbonio rimane dentro, sugli spigoli
della cella che si forma \rightarrow TETRAGONALE
struttura metastabile (Martensite) e
tensionata (\rightarrow fragile e duro)

12

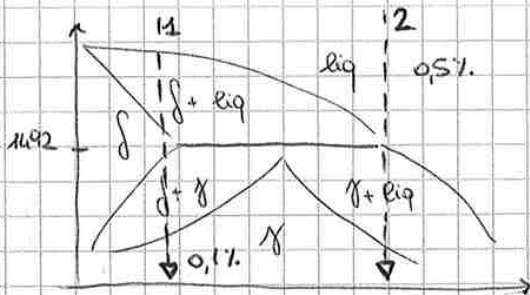
criticità zona fusa → struttura dendritica

- disuniformità strutturale-morfologica
- il gradiente di temperatura si traduce in gradiente di solidificazione
- solidificano prima le zone esterne e infine il centro → ∇T nella solidificazione → modifiche



- segregazione : equilibrio tra scuo formati e liquido ancora presente
- := avremo nel cordone di saldatura = zone di diversa composizione

la parte più esterna seguirà l'arricchimento 1, solubilizzando meno carbonio
 la parte più interna l'arricchimento 2, solubilizzando più carbonio e impurità



(14)

PLASMA

all'interno fuso con plasma

FASCIO ELETTRICO

all'interno fuso + vuoto + fascio elettronico

1958 LASER

fotoni, energia fotonica su superficie del materiale

problemi: traiettoria rettilinea (poi scaldato per conduzione)

spigoli (semiscaldamento)

es

aerospaziale: pezzi di Al che si rompevano a fatica

doppio trattamento del punto iniziale e finale (che NON avviene se traccio meccanico)

1991 FRICTION STIR WELDING

generare calore per attrito meccanico, movimento relativo

si utilizza per alluminio e difficile anche per l'acciaio di sterovale e per attrito → calore

NON si arriva a fusione ma STATO PASTOSO con COMPENETRAZIONE (non allo stato liquido) ~ BOUTURA

es. SPADE

parte esterna dura
interna con meno C

] per non renderla fragile



3 lame 2 dure
1 con meno C (al centro)

] → scaldare e battere
finché non si penetrano

x giunture ACCIAIO-AL

a contatto di testa + rotelle che in pressione

semiscaldano per avviare fase pastosa

16

... durezza := ambito metallurgico
 prima scala NUMEROLÓGICA (scalifizio)
 ora SCALA: resistenza a deformazione e penetrazione
 ↓
 penetratore (con punta sferica, piramidale) + carico

• ROCKWELL: di quanto entra dentro il materiale: profondità

• VICKERS: area impronta sul materiale

↑ durezza ↑ resistenza meccanica

configurazione del giunto saldato

Per ottenere la massima efficienza del giunto è necessario realizzare la completa penetrazione della zona fusa.

Per spessori contenuti è sufficiente la SALDATURA CON VENTI RETTI in una o due passate contrapposte
 Per spessori maggiori si ricorre alla preparazione dei LEMBI CIANFRINO e alla saldatura multipassata

cicli termici di saldatura

Il calore viene dissipato per irraggiamento, convezione e CONDUZIONE

Le leggi di riscaldamento e raffreddamento nelle varie zone dipendono dalla CONDUCIBILITÀ TERMICA del metallo base e dalle caratteristiche geometriche del giunto

In zona fusa il metallo in fase di solidificazione subisce delle contrazioni volumetriche che generano tensioni e possibili CRICCHE (a CALDO) oltre che distorsioni

In ZTA la rapidità dei cicli di raffreddamento può modificare significativamente la struttura del metallo (es: acciaio legato passaggio da austenite a martensite)

T_{max} NON è raggiunto nello stesso punto

Cricche a Caldo sono lacerazioni che si manifestano in zona fusa durante la solidificazione del metallo saldato.

CAUSE:

A temperature intermedie tra solidus e liquidus si formano dei legami tra i 2 fronti di metallo in fase di solidificazione ma permane la presenza di liquido (SEGREGAZIONI)

+ tensioni di ritiro (per il passaggio allo stato solido) + tensioni indotte dalle denture (in contatto e incassate)
 + elevate temperature (ridotta resistenza meccanica delle leghe metalliche)

↓ distensione:
 Immerso in Azoto liquido a $-273^{\circ}C$ → fragile → lo rompe e vedo la superficie della cricca se SUPERFICIE OSSIDATA è causa a CALDO ← cottura a riscaldamento.

Cricche a freddo si formano in ZTA a fine raffreddamento

CAUSE: accumulo di tensioni per i ritiri, dovuti ai gradienti termici
 strutture fragili con elevata durezza (spesso con martensite)

... SALDATURA

Effetto laggi: si evidenzia quando è presente uno strato di ossido tra la zona fusa ed il lembo da saldare e causano una notevole riduzione della resistenza meccanica del giunto soprattutto nelle leghe che formano facilmente ossidi (Al) e per saldatura a bassa protezione (oss. acetilenica)

Effetto dell'inquinamento atmosferico: il metallo fuso tende ad assorbire ossigeno azoto e idrogeno con effetti deleteri per la saldatura

effetto ossigeno: tende a formare precipitati → ossidi negli acciai
tende ad entrare in soluzione → sovrassaturazione nella solidificazione → forma CO che possono rimanere intrappolati nella zona fusa originando POROSITÀ

effetto azoto: la solubilità si riduce passando da liquido a solido → soluzione solida sovrassaturata negli acciai dolci → fenomeno simile all'invecchiamento nelle dissecazioni
→ forma nitruri con effetto **infragilente**.

protezione del bagno metallico:

- atm sotto vuoto (se saldatura a fascio elettronico)
- atm povera di ossigeno e azoto (+ Argon ed elio) (se saldatura TIG o MIG, plasma o laser)
- CO e H₂ che in combinazione non danno ossidi (se saldatura ossi acetilenica)
- strato di scoria (se saldatura ad arco sommerso)
- gas inerte + scoria rivestimento elettrodo (se saldatura con elettrodi rivestiti)

+ DISOSSIDAZIONE con Silicio e Manganese → ossidi nella parte alta della parte liquida

usce elettronica: 2^+ sono e^- di $4s^2$ (banda di conduzione) = elettroni di valenza e conduzione
 ma rimangono orbitali incompleti



ogni ione di ferro ha un momento magnetico residuo che è responsabile dei fenomeni ferromagnetici

DIAMAGNETISMO

si oppone al campo magnetico

moto e^- in moto che dall'esterno non forma campo magnetico \rightarrow tutto bilanciato all'interno atomo

se + campo magnetico \rightarrow moto e^- disturbato (dal minimo di energia \rightarrow energia aumenta)
 il materiale genera un campo magnetico in opposizione al campo magnetico esterno induce le linee di flusso si diradano \rightarrow diminuzione campo magnetico

FERROMAGNETISMO (e favorisce il campo magnetico)

Fe: 4 e^- spinti \rightarrow 4 momenti magnetici residui (~ 2.6) fino a 768°C
 (Cobalto fino a 1115°C e Nichel fino a 355°C)

DOMINI MAGNETICI: volumi di materiale dentro i quali si ha un ISORIENTAMENTO dei vari momenti magnetici residui degli atomi

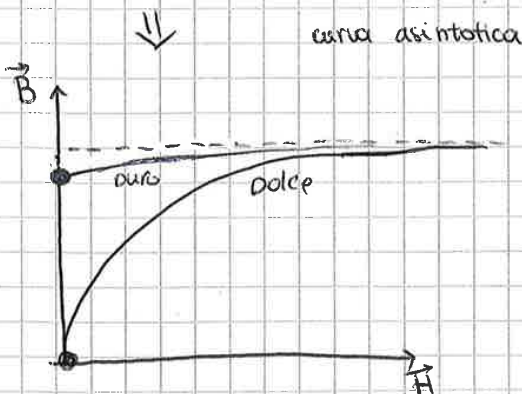


DOMINI DI ~~WISS~~ WEISS

la loro somma è NULLA \rightarrow non si percepisce da fuori

CONDIZIONE DI MINIMA energia (+ disordine)

- Se + campo magnetico esterno \rightarrow progressivo isorientamento con quello esterno di tutti i domini (movimento di massa grazie alle dislocazioni)



asintoto: = condizione di saturazione (più di così NON si può andare) \rightarrow FORTE RAFFORZAMENTO

- Se toglia il campo magnetico esterno: la tendenza è di non tornare al disordine (minima energia)

Materiali MAGNETICAMENTE DOLCI facilmente effetto reversibile e si smagnetizza
 es) elettrocalamite (telefoni americani con elettrocalamite e spacia carrozza)

Dolce: = poco resistente (es) lamiere) e si deformano subito

Taurne

Fe	768°	(Femite α / Ferrite β)
Ni	343°	
Co	1115°	

ci sono altri milioni ma con Taurne sotto a Taub → NON conviene perché bisognerebbe sempre raffreddarlo
 (Termodinamica + bassa T, meno difetti → ideale OK con entropia nulla HA IMPOSSIBILE)

anti-ferromagnetismo (CENNI)

FERRI MAGNETICI

differente: nei domini NON si ha un TOTALE isorientamento ma solo una risultante dominio per dominio diverso da zero (se = 0 → paramagnetici)

APPLICAZIONE PRATICA
(per lo più militare)

es. ing. massima militare ha studiato effetti magnetici x produrre difese (basterebbe una bomba con calamita) x non essere aggrediti:

BACCIAIO AUSTENITICO

soprattutto per i sottomarinati (scafi)

es. microscopio elettronico → sottorende x NON avere scorie ma perturbazioni elettromagnetiche dovute treni, tram

↑
NON era schermata

es. massima militare con BOMBA e studio onda d'urto sul sottomarinato

↓
ACCIAIO austenitico (con NON è MAGNETICO) ma alcuni elementi non possono essere austenitici (es. cannoni, motori)

↓
NON resiste a fatica ed è deformabile

↓
SCHERMATURA ELETTRONICA

↑
con come il segnale orario Torino per renderli insensibili

es. per vedere se è ferromagnetico o meno: CALAMITA (no cucchiaino, forchetta, si coltelli)

20.11.2018

24

Le proprietà metalliche dipendono dalle dislocazioni che da sole hanno senso solo se **MATERIALI CRISTALLINI** (materiali in cui atomi sono disposti in posizioni ben definite e ordinate nello spazio)

↳ non è specifica unicamente dei metalli

Le dislocazioni si muovono lungo i piani in particolari direzioni degli edifici cristallini
 7 celle fondamentali o primitive (a, b, c, x, y, z), + configurazioni derivanti → 14 reticoli di Bravais
 Principalmente (leghe ferro, Al, Ti, Cu) sono caratterizzati da reticolo cubico o esagonale
 Le dislocazioni erano solo ipotizzate dovute al calcolo della tensione necessaria della deformazione con valori molto elevati rispetto a quelli reali: ⇒ Hp di difetti che provocano le dislocazioni (poi verificate e fotografate)

altra prova del reticolo cristallino dei metalli: tramite: **RAGGI X**

MACRO RANGENOGRAFIA

Diffrazioni di raggi x e raggi X e METODO RADIOGRAFICO di analisi

raggi X: nel 1895 esperimento catodo + anodo + lastra fotografica → 1° radiografia della mano
 in grado di attraversare la materia e di imprimere le lastre fotografiche
 = radiazioni elettromagnetiche (≈ luce) non sono dotate di massa, ma di una certa energia

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{con } \lambda \approx 10^{-10} \text{ m} \quad (\approx \text{distanze interatomiche})$$

→ ionizzano la materia che incontrano + apparecchiature radiografiche

- 2 tipi di interazioni con la materia:
- penetrazione della materia (MACRO) e impressione lastre
 - diffrazione (fenomeno MICRO)

STORIA ATOMICA tecniche macro: lastra radiografica a raggi X

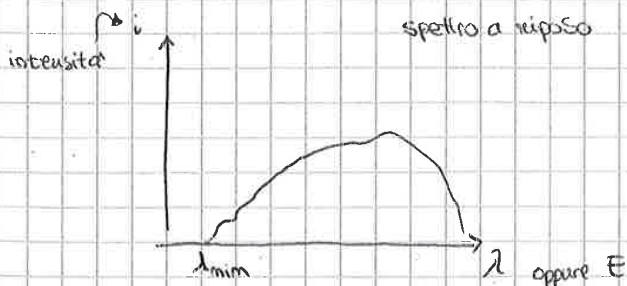
generato da lastra di röntgen (tubo sottovuoto con spirale di nichel percorsa da corrente, conduttore reale, che scaldandosi emette elettroni)
 + campo elettrico B: con anti catodo accelerati e⁻ che li colpiscono → RADIATIONI RAGGI X

= prodotto di collisione degli e⁻ emessi dalla spirale a contatto con anticatodo
 si sviluppa calore, cedono parte dell'energia agli atomi che incontrano e parte all'ambiente esterno

ATOMI := non taglievoli; storia atomica: Thomson, Rutherford, Neutroni
 2 flussi di materia (uno alitato dall'anodo, l'altro catodo) ⇒ raggi di curvatura differenti
 ↳ scoperta di protoni e neutroni ed elettroni = particelle subatomiche

Planck, Bohr - Sommerfeld
 ↳ elettroni = oggetti dotati di energia ed è legato ad un livello energetico → orbite;
 meccanica quantistica, c'è pacchetti discreti di energia, quanto (luce = fotoni)
 emissioni discrete, NON continuo, ma a pacchetti

e⁻ velocità ≈ 310⁹ m/s, errore ⇒ misura fatta → problema risolto in chiave probabilistica con Schrödinger → orbitali



per λ_{min} → max energia

se si usa tutto lo spettro si utilizza la radiazione bianca

se le radiazioni sono più energetiche sono più penetranti

spettro di fondo o bianco: se costituito da un continuo di energie e di lunghezze d'onda

radiazioni monocromatiche: con 1 sola lunghezza d'onda

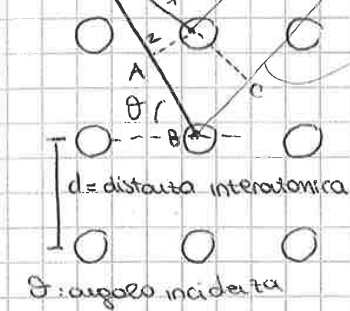
26.11.2018

26

raggi X in ambito metallurgico

diffrazione prova principe che i materiali metallici sono reticoli cristallini
 fenomeno complesso che si vede quando raggio atomico \sim lunghezza d'onda ($\sim 10^{-10}$ m)
 estremi superficie
 [per noi: normale onda elastica che segue le leggi di riflessione]

quando una radiazione (raggi X) entra in contatto con un reticolo cristallino:
 incidente raggi X (Hp all'infinito) \rightarrow radiazioni emesse in parallelo (coerenti, stessa fase)



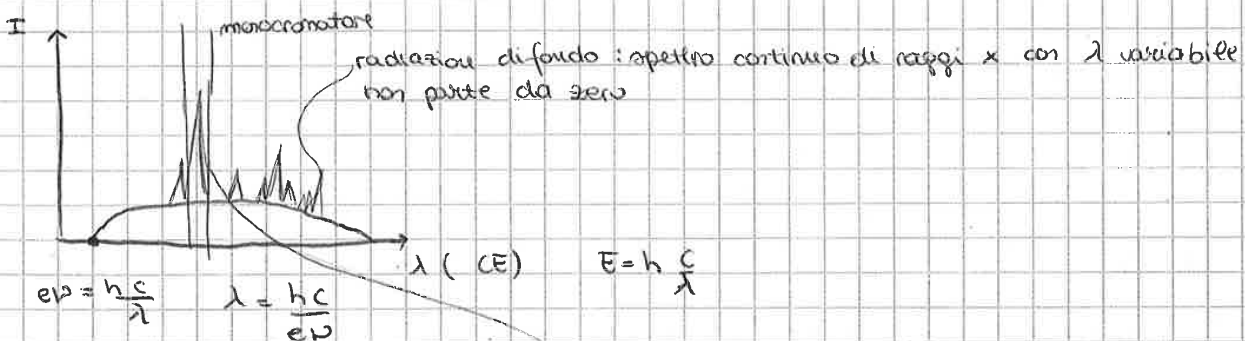
\rightarrow semplicemente riflessa
 \rightarrow piastra fotografica o contatore Geiger
 in cui avremo il segnale max quando le 2 onde arrivano in concordanza di fase.
 Dato che partono in concordanza bisogna che la differenza di cammino ottico sia uguale ad un numero intero di λ , in modo da non sfasarsi

$$\overline{AB} + \overline{BC} = n \lambda$$

geometricamente $\overline{AB} + \overline{BC} = n \lambda = 2d \sin \theta$ intero $\rightarrow n \lambda = 2d \sin \theta$ legge di Bragg

prova della cristallinità dei materiali metallici

legge tipologia di reticolo (d)
 geometria dell'esperimento (θ)
 lunghezza d'onda (λ)



elettroni, anodo a cui cedono energia; e^- dell'anodo assorbono energia \rightarrow saltano di livello energetico e di orbitale (condizione sovraenergetica) emettono questa E in fotoni come raggi X per tornare alla condizione di partenza

tale quantità è ben precisa \rightarrow ci sono dei picchi sulla radiazione di fondo

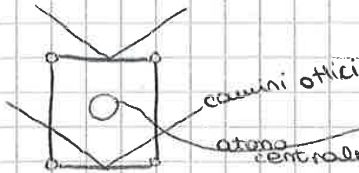
raggi X emessi dall'anodo generati dal ritorno degli e^- agli orbitali originali

selettivamente e interi ($k \cdot e$)

radiazioni monocromatiche

nella legge di Bragg λ è quella dei picchi
 Se ne seleziona una (tramite il MONOCROMATORE (filtro che assorbe tutte le radiazioni tranne una con un preciso λ))

Se CCC mostra (1,0,0)



è in opposizione di fase → le 2 facce NON si vedono

eccezione: SOLUZIONI SOLIDE ORDINATE

in cui atomi sono SOSTITUZIONALI (entrata casuale) → NON riflettono

INTERSTIZIALI:

es Cu-Zn è CCC 8 vertici di Cu
1 atomo di Zn al centro

ma comunque c'è una parziale riflessione del piano perché varia il fattore di assorbimento

la radiazione incide sull'atomo e viene riflessa ma NON tutti gli atomi riflettono allo stesso modo

trasformazione

ORDINE



454 °C



DISORDINE

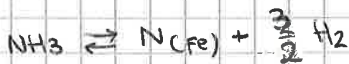
→ sparisce riflessione (1,0,0)

ferrite, Al, Cu, leghe di Al, leghe di Cu] a seconda della fase
↓
da cui sostanza

fattore di assorbimento varia da sostanza a sostanza → altezza dei picchi differenti che non è direttamente proporzionale alla quantità di fase presente.

CURVE di TARATURA

a seconda della quantità → analisi quantitativa



80 + 90h avvicinamento superficiali di atomo
+ fase di Nitruro
+ soluzione solida Atomo ferrite

cementificazione



950 °C

4:5h

superficie di C (0,8%) + cuore C (al 0,1%)

se ho atomi interstiziali → Picchi spostati (ho una soluzione e non pura)
più è anticipato più non è puro

[con la taratura risulta alla quantità di elementi interstiziali in soluzione solida anche solo con i raggi X (prova NON distruttiva) → VEDO LE CARATTERISTICHE MECCANICHE

ES mi identifica subito la morfologia → TETRAGONALE, avro' a e c → sviluppo del picchio

03.12.2018

30

Controlli non distruttivi CND o Prove non distruttive PND

strumento che ti permette di operare in condizioni di sicurezza analizzando anomalie, difetti dei materiali.
 IIPD per aerospaziale
 non sui componenti finiti sia a monte

= metodologie di indagine per rilevare discontinuità in un pezzo (senza danneggiarlo) → tutti i pezzi.
 NON distruttivi permette il controllo 100% dei pezzi
 non esistono metodi migliori/peggiori IT ALL DEPENDS =)

1°: occhio umano operatore indaga e visivamente si rende conto di anomalie visibili (macchiate, cicchie, anomalie cromatiche)
 ↓
 SOGGETTIVITA' dell'analisi
 LIMITE della preparazione, esperienza, attenzione del soggetto (operatore)

analisi chimica analitica (+ costi)

galvanometro spettroscopio di massa, crea una scintilla/arco che fa evaporare un po' di materia e misurando → analisi quantitative e qualitative.
 (più diffusa, da 50 a 200.000 €)

es i più esperti dalla semplice forma e colore della scintilla → indovinarlo HA ancora SOGGETTIVA
 provocate da una molla che batte sul materiale
 a seconda della radiazione luminosa emessa

RENDONO MENO SOGGETTIVA L'ANALISI, risposte + OGGETTIVE (che poi comunque devono essere interpretati)

→ SCOPO: emissione di giudizi di accettabilità dei singoli pezzi CODIFICAZIONE, per evitare danni (anche economici) e incidenti
 + norme interpretative (differenti a secondo dell'impiego)
 Qualità di qualità

es STAMPO per automobile che ha bloccato la produzione per 6 mesi bloccando a valle e a monte

Scelta del tipo di Controllo:

a) seconda del difetto che sospetto di sia: della tipologia attesa: forma, posizione, orientamento

b) Limiti del metodo: che ne circoscrivono il campo di applicabilità (es per i raggi x devo aver accesso da 2 lati del materiale)

c)

a) Materiale del parti colose da controllare
 composizioni chimica (analisi lunga e costosa)
 caratteristiche meccaniche
 trattamenti termici
 rivestimenti superficiali o trattamenti superficiali
 (sono a loro volta influenzate dalla composizione chimica e trattamenti termici)

Cementazione:	arricchimento di C	900°C	4/5 h
Nitrurazione:	Azoto	500°C	90 h
Nitru	arricchimento di C e Azoto	560°C	5/6 h
Carbonitrurazione		880°C	5-6 h

per aumentare la resistenza a fatica o per la protezione (Zinco, ...)

es. Taccato: acciaio pulito che esce ma non accettato → ^{putato a} accidenza elettrica

2) che sorgono durante la colata

- di **Cristallizzazione** che impone una ricottura o danno a disomogeneità chimiche cuore/superficie.
- di **Segregazione** liquido e solido nel liquido tutte le impurità (= presenza di variazioni di composizione chimica)
- **Cavità** da ritiro: se liquido solidifica → contrazione → cavità dovuta alla la parte in alto (MATERIA) (è in più), che assorbe tutti i difetti da ritiro e poi viene eliminata compressa
- **Inclusioni**
- **Cricche** dovute ad inagorie scatenate o forti tensionamenti (riscaldamento/raffreddamento ~ cricche)
- **Porosità** comess^e al tipo di produzione (ad esempio dopo la colata) (precolata è traumatica: lo spazio in stampi di acciaio → + produzione ma non riesco a degasare)

3) che sorgono durante l'esercizio

- **fatica** (90% del totale): applicazioni continue e ciclica di carichi (nata dal '700: prima le costruzioni erano statiche, ora meccanica)
 cicca
 zona di mesco
 zona di propagazione
 ↓
 al microscopio elettronico ci sono archi = aumento della cicca
 aumenta, mi erode → rottura per schiocco
 non forte continue ma che variano nel tempo, carico-scario → cricca

aumentando velocità di raffreddamento:

• normalizzazione

lo raffreddamento in aria calma

è il MENO COSTOSO (occupa il forno solo per scaldare)

(se non ci sono altre specifiche di solito si intende che è normale tutto)

mi toglie le tensioni pressoché

Δt

dipende dalle dimensioni del pezzo: se grosse dimensioni è più lento (dovuto all'inerzia termica) e si \sim alla ricottura se piccolo si avvicina di più alla tempra

• Tempra

energico e veloce raffreddamento per evitare la trasformazione di austenite in ferrite e cementite ma vogliamo martensite

Più costoso: cottura pezzi ed è sempre associato al REINVENIMENTO (scaldamento martensite a 600°C per 1h → in una struttura non usata con grossi fumi che aumentano tenacità e caratteristiche meccaniche) e forma (cementite e ferrite)

REINVENIMENTO \equiv tempering (Bonificato) \neq Tempra (NB tradizione)

↳ scaldare a $T < T_{austenitica}$

Durante il Riscaldamento:

se le temperature sono elevate in tempi brevi → giochi tensioni-compressioni → rottura ma di solito avviene un fenomeno dovuto all'interazione con la atmosfera → ossidi

(Ossido è più stabile a basse T, ad alte T ho fenomeno di dissociazione e quindi le molecole (ossidi) sono meno stabili. Infatti per produrre i metalli si prende l'ossido e si riduce al metallo eliminando l'Ossigeno, ed avvengono ad alte T. Per l'aspetto pratico: la velocità di reazione aumenta all'aumentare di T: si ossidano più facilmente (ma gli ossidi sono meno stabili))

→ ossidazione + Decarburazione ($O_2 + C$) → strato superficiale bianco con caratteristiche che NON meccaniche perché è decarburato.

2 possibili interventi sul pezzo:

Grezzo: prodotti che dopo il trattamento termico devono subire altre lavorazioni meccaniche perciò NON si fa nulla (→ trattare il grezzo è meno costoso)

Finito: pezzi che dopo non subiscono altre lavorazioni o solo lavorazioni marginali, bisogna proteggere la superficie dei pezzi (dall'ossidazione e decarburazione):

- sostituire l'aria con un gas protettivo: Azoto, Elio, Argon ma costa perché bisogna separarla dall'aria e dall'ossigeno (azoto tecnico/industriale/puro a seconda della % di O_2)

per separare:

- 1) bacio l'ossigeno trasformando O_2 in CO_2 e basta farlo gorgogliare in H_2O → acido carbonico con più ripetizioni e setaccio finale

- 2) Distillazione frazionata: →

OTTUALE:
 Per raffreddare: (veloce in alta T per trasformare in martensite da 600-800°C / lenta a bassa T per omogeneizzare ed evitare shock termici)

H₂O facilita molto le rotture
 fa l'opposto dell'OTTUALE
 dovuta alla guaina di vapore che isola il pezzo dal liquido " → lento poi passano a bassa T e evaporano → veloce

CARREFAZIONE }
 (il vapore è un pessimo conduttore di calore)
 metodo più drastico
 OK acciaio a Carbonio (quelli legati in olio o gas)

Mai da soli:
 + sali o acqua Chen (miscela alcoliche) - limitano la guaina di vapore

OLIO OK per acciai legati ma brucia e fa fumi
GAS per acciai alto legati

Metodo radiografico ideale per la ricerca di difetti e discontinuità tridimensionali: basa il suo principio sulla variazione di attenuazione che subisce una radiazione ionizzante attraversando la materia, quando i raggi X incidono su di un oggetto convenzionale (pellicola radiografica, schermo fluorescente) e riproducono l'immagine in chiaro-scuro dell'oggetto attraversato

vantaggi: applicabilità alla maggior parte dei materiali (NO ferromagnetici)
 possibilità di rilevamento di difetti a profondità maggiore rispetto ad altri metodi

svantaggi: difetti bidimensionali (cracks) possono essere rilevati se orientati // rispetto alla radiazione
 bisogna ripetere leggi severe → maggior costo

Magnetoscopia richiede materiali FERROMAGNETICI
 Al di sotto della T_{Curie} (Fe T_{Curie} ~768°C, Cobalto 1115°C, Nichel 345°C) il comportamento è magnetico e non vi sono differenze tra ferro α e β.

Le linee di campo attraversano il pezzo se esso è integro, se invece vi sono delle discontinuità le linee di campo vengono alterate.
 Immerdendo la superficie con un liquido vettore contenente in dispersione una fine polvere con caratteristiche ferromagnetiche, attratta dal campo magnetico e con forma in corrispondenza delle discontinuità un accumulo (visibile ad occhio nudo)

IDONEO per difetti superficiali o sub-superficiali, **SOLO** per FERROMAGNETICI (NO INOX, NO AUSTENITI)

vantaggi: discontinuità superficiali e sub-superficiali
 possibile parziale automazione

svantaggi: solo ferromagnetici
 solo zone accessibili
 se magneticamente duro → durezza → bisogna smagnetizzare

Liquidi Penetranti immersione in un liquido a bassa tensione superficiale, capace di penetrare entro eventuali discontinuità effioranti in superficie.
 Dopo di cui viene rimosso l'eccesso e con un opportuno elevatore per ad sobriamento si formano delle indicazioni anche ad occhio nudo.

vantaggi: ogni tipo di materiale (NO POROSI)
 semplice con buona redditività e basso costo

svantaggi: non rileva discontinuità sotto pelle
 solo zone accessibili
 (necessità il trattamento delle acque reflue)

Ultrasuoni con onde di tipo sonoro, (non ionizzanti, ma vibranti). Le onde sonore vengono respinte o smorzate se incontrano un difetto; può essere a secco o ad immersione

vantaggi: velocità di esecuzione
 preciso (elevato livello di sensibilità) ed in profondità (fino a 20m) dato che si propagano nel mezzo
 automatizzare il controllo

svantaggi: NON OK se alta attenuazione acustica (fonoassorbenti) (o spugnosi)
 se geometria complessa, elevata rugosità superficie del pezzo non in ottimo stato.

4. GRINDING

con corse abrasive che con particelle di carbonio di silicio e sono divise in base al numero di particelle/unità di superficie
 N basso → GROSSELANE (v. 60)
 N alto → FINI (v. 3000)
 si parte dalle più grosse e una grazie ad un moto relativo (pompa fatto a mano) e acqua vulgare (di rubinetto) come lubrificante
 si avvicina quella più fini ruotando di 90° e quindi una quadri così facendo da un passaggio all'altro in modo da eliminare le linee abrasive

5. Polishing

lucidatura sui panni di velluto con polvere di diamante industriale (14 μm) con liquido lubrificante alcool dietilico procedendo da quello più grossolano a quello più fine

anche se sembra un procedimento lungo ma con l'esperienza fino a 15 min

Oppure: LATTE DI ALLUMINA soluzione acquosa che lucida benissimo ma centrifugando viene schizzato fuori → sporca

6.

Il campione pronto è messo in microscopio che con la luce riflessa vedo un cerchio bianco se il campione fosse perfetto, ma solitamente non lo è a causa di inclusioni (fasi non metalliche) che non riflettendo sono scure, oppure grafite (di cui vedo la morfologia) delle leghe di ghisa, oppure la presenza di cricche

7. ATTACCO ATCHING

Mettere a contatto la superficie del campione con un debole reattivo in tempo limitato in modo da reagire in modo selettivo solo le zone ad alta energia e NON tutta la superficie (per non corroderla) che si distaccano dal resto del campione
 es NITAL (acido nitrico + alcool etilico) ma soluzione molto diluita 1/5% in 15 secondi
 talmente tenue da poter venire a contatto con le nostre mani (potere agguerrimento MOLTO LIMITATO)

vedo i bordi di grano scuri
 per (Azeleme) zone polifasiche se vedo scure

mi fa capire le dimensioni, forme dei bordi di grano e le fasi presenti

Microscopio elettronico

non usa la luce ma gli elettroni in un tubo sottovuoto (COLONNA) e la prepara in questo caso PULZIA sgrassandolo da ultrasuoni per pulire la spositiva campione ≡ ANTICATOLO che riflette elettroni raccolti sul monitor i deve essere CONDUTTIVO, grazie alla metallizzazione con pellicola di oro o grafite o particello elettronico in rame)
 es Scanning Electronic Microscopy (SEM) il campione viene scansionato

La differenza principale NON è tanto nelle diverse scale di ingrandimento ma che l'elettronico mi permette di vedere la 3° dimensione Profondità 3D

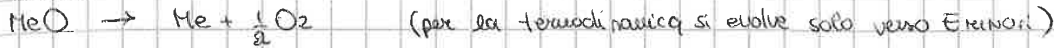
utile per indagare le superfici di frattura e nello studio della fatica

PRODUZIONE MATERIALI METALLICI

Idierurgia

Le minerali di partenza sono tutti riconducibili ad ossidi metallici; dal punto di vista metallurgico quindi consiste nella separazione del metallo dall'ossigeno

N) METALLI



DISSOCIAZIONE DELL'OSSIDO

Energia := $G = H - TS$ Gibbs-Helmholtz

entropia: energia propria del sistema

entropia: configurazione ordinata/disordinata il cui effetto è modulato da T (nullo a basse T)

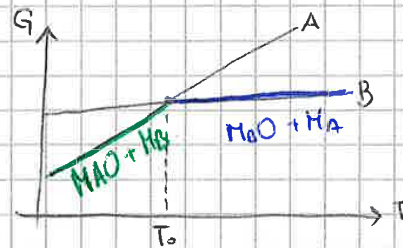
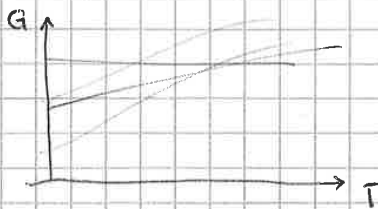
SISTEMI DISORDINATI: simultaneità di più sistemi ordinati ed ha più possibilità di evolvere rispetto ad uno ordinato, perché ha più sistemi possibili

Me solido

O₂ gas: l'ossido è più ordinato essendo solo solido (MeO₂s)

Il fattore determinante è T

conseguentemente, all'aumentare di T l'ossido metallico aumenta la sua entropia



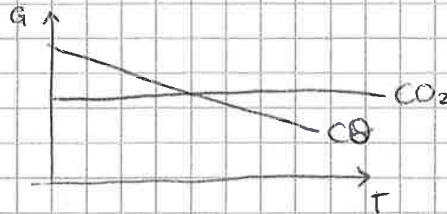
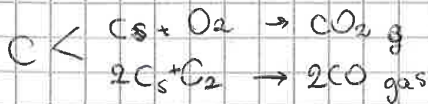
inizialmente l'energia più bassa è di MA ed è in grado di ridurre l'ossido della sostanza MB ovvero avremo MAO + MB (fino a T₀)

oltre T₀ rimane il metallo MA e si ossida MA MeO

la reazione va da SINISTRA a DESTRA

s := solido
g := gas

• CARBONIO



l'entropia ossido >> Carbonio + Ossigeno

Tutti gli ossidi metallici possono essere ridotti dal carbonio → diagramma di ELLINGHAM-RICHARDSON

Il primo elemento che si riduce è il RAME (a 800°C)

Mentre Alluminio oltre i 2000°C

Il ferro tra i 700-1100°C → non basta scaldare gli ossidi di ferro ma devi combaciare con l'entropia forzata per raggiungere queste T e l'acciaio ottenuto ossigenalmente si chiama ferro pudellato

(Produzione acciaio ITALIA 10 milioni (seconda in EU))

⇒ GHISA 4% di C con manganese, silicio, zolfo, fosforo

Bilancio dei PRODOTTI: per 1 Ton di ghisa:
 2 Ton minerale (con 50% di Fe)
 0,9 Ton Coke
 0,4 Ton Calce
 4 Ton aria

x esigenza al giorno (perciò navi, porti: Taranto, Napoli, Genova, Piombino...)

↓ PRIMA dei CONVERTITORI

converte la ghisa in acciaio, ma prima dobbiamo togliere lo zolfo (nocivo) perché altrimenti poi non si elimina:

La ghisa è trasportata su carri sicuro o siliese

Si aggiunge sodio → Solfuro di sodio che sale in superficie per essere eliminato

CONVERTITORI

bisogna togliere il carbonio bruciando

Attualmente Lehr's Donaldis (LD) con refrattario basico (scoria basica) che lui porta via il fosforo

come mezzo ossidante ossigeno puro (e non aria perché ha anche Azoto)

100 Ton ÷ 300 Ton

Processo veloce 15 min + 30 min (// Altoforno 1 giorno)

Bruciando: reazioni di ossidazione: crolla tenore di Carbonio, fosforo, manganese, Si... e possono reagire tra di loro

in parte nel bagno, in parte reagiscono con la scoria

MA il tenore di zolfo è costante, perciò si toglie prima

Bilancio Termico: per vedere se gli elementi sostengono il processo o meno. ciò che tiene in piedi il processo è il SILICIO che quindi deve avere un Tenore elevato (nell'altoforno conviene stare sopra i 1600 °C)

Ci si deve fermare prima dell'ossido del ferro; prima si faceva ad 'occhio': fiamma bluastro vuol dire che si sta intaccando il ferro adesso con gli spettro-fotometri che tengono sotto controllo il bagno

→ Ferro pressoché puro stracarico di Ossigeno

2 possibilità: - Solidifichiamo (senza far nulla) → acciaio con Fe puro e ricco di O con caratteristiche meccaniche ridotte
 costo basso
 la pelle è molto pulita (i gas si concentrano nel centro) e libera da elementi leganti, ok per la verniciatura
 scorie con caratteristiche meccanica
 → per componenti estetiche **ACCIAI FERVESCENTI**

- Azioni di calmaggio per togliere l'ossigeno grazie all'Aluminio e l'ossido di alluminio (più leggero) si deposita in superficie

ACCIAI CALMATI all'Aluminio (Aluminum killed Steel)

a volte in sottotop con Argon o FeO per far ballare meglio. XD "la pancia non indaga"

poi aggiunte dei leganti secondo la composizione desiderata.

fenzi di martensite (in funzione delle condizioni di processo T e % di C)
dal 10 + 100 %

↓
500 + 2000 MPa di resistenze

↓ SKIN PASS

La superficie rimane corrugata dopo la ricottura perciò laminano fino al massimo 5%
per spianare la superficie per anti invecchiamento

↓
oliato
Zincato, re Spolito

CICLO DA ROTTARE (con più marginale come prima)

acciaieria elettrica sono più piccole, meno impatto ambientale; in montagna per essere idroelettriche.

dipende da % acciaio vergine (perciò non si possono chiudere le acciaierie → bloccherebbe tutto)

↑
(40%)

STAMPI spring back bisogna considerare il ritorno elastico: le dimensioni del pezzo NON sono quelli dello stampo

? CONSIDERARE COSTANTE IL MODULO ELASTICO E

conventionalmente $E_{acciai} = 210 \text{ GPa}$ in realtà sperimentale varia da materiale in materiale la più varia (diminuisce) all'aumentare della deformazione.

ES) Era doverano tenere conto per regolare la luce dei cilindri di laminazione

Campo PLASTICO

$B''B'$ energia elastica

$B''B'$ ritorno elastico

OB'' deformazione permanente

Ma per aumentare la deformazione plastica bisogna aumentare anche la deformazione elastica
COMPORANTAMENTO ELASTOPLASTICO

Dopo il carico massimo (C) e l'aumento cambia: aumenta la componente plastica (OC'') la componente elastica aumenta finché non si raggiunge il carico massimo (C)

per il punto D la componente elastica è via via inferiore aumenta la deformazione plastica permanente (OC''), diminuisce la componente elastica

Tale comportamento superato il carico massimo è dovuto alla **STRIZIONE**

La deformazione NON è più equamente distribuita su tutto il tratto calibrato, si concentra in una zona ristretta di materiale (per questioni di simmetria a metà campione)

è una deformazione localizzata, non interviene più la deformazione elastica

Si parla intermini RELATIVI e NON ASSOLUTI

→ la forma del diagramma non varia (cambieranno le scale)

$\sigma = \frac{F}{A_0}$ (nominale) $\epsilon = \frac{L}{L_0}$ (nominale)
 $\sigma_{reale} = \frac{F}{A_i}$ (reale) $\epsilon_{reale} = \frac{L}{L_0}$ (reale)
 A sezione iniziale = cost

$\sigma_{reale} = \frac{F_{max}}{A_i}$ $\epsilon_{reale} = \frac{L}{L_0}$
 istantanea

Il volume non varia, ma può variare la forma. → $\sigma_{reale} = \sigma_{nominale} (E+1)$

In campo elastico la variazione è minima (E estremamente piccola $\sigma_{reale} \sim \sigma_{nominale}$)

In campo plastico la curva a seconda che sia disegnata in coordinate nominali o reali cambia

In reali: curva MONOTONA crescente (sempre) (perché nella strizione carico e sezione diminuiscono entrambi)

secondo l'espressione $\sigma_{reale} = K \epsilon^n$

dipende dal tipo di materiale

$n = \text{coeff. incrudimento}$
 $E = \text{allungamento reale}$

pendenza della curva nel campo plastico

$n=1$ campo elastico (HOOKE)

$n=0$ campo plastico $\sigma_p = K$

$n=0$ il materiale, se per plastico, si comporta come FRAGILE, il materiale si rompe immediatamente



$E_{Fe} = 70 GPa$
 $E_{acciaio} = 210 GPa$

→ risposta diversa alla deformazioni e utomo elastico

↓
bisogna usare stampi diversi
(\Rightarrow più difficile stampare Al dell'acciaio)

ACCIAI DA PROFONDO STAMPAGGIO

E elevato

Coeff anisotropia elevato
carico di snervamento

(aumenta all'aumentare dell'ingrandimento grani)
per basso possibile (per avere campo plastico mi metto dopo il carico di snervamento, la def. elastica fa perdere tutta l'energia nell'ambiente. x avere con potenza ridotta, minor ritorni elastici)

Chimicamente 0,4% C
0,03% Al

acciai calmanti → con la cottura si forma il nitrato di Al che dalla soluzione deve precipitare e bloccare la crescita dei piani delle dislocazioni nel senso dello spessore

(allungamento diverso nelle varie direzioni)
ANISOTROPIA

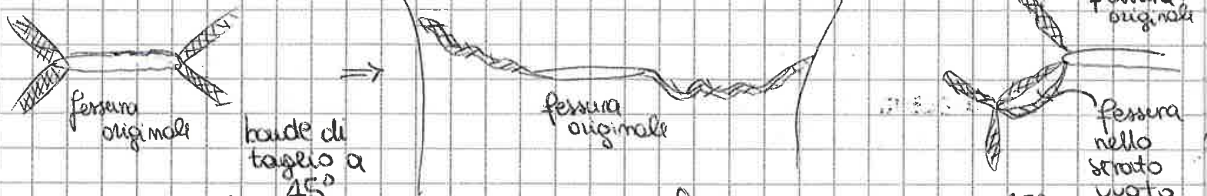
non si deve assottigliare ma solo restringere per non avere STO. CHEAPING

Frattura duttile nei Polimeri stallini o con spemoni non trascurabili (copra o cono)
 (→ inclusione, orlato, carburo ...)

Per simmetria parte dal centro da una particella di 2° fase in un piano macroscopicamente perpendicolare all'asse del carico applicato. Termina ai bordi del grano.
 Il meccanismo consiste nel separare la particella dalla matrice con dislocazioni (che insistono e creano un campo tensionale che fa staccare). La particella è dentro una cavità (vincolo) che può crescere (involando ad altre cavità di particelle adiacenti) e avremo la FESSURA.
 L'apice non è arrotondato, è acuto (quindi è un fattore di taglio) → stato sollecitato



all'apice fessura: carico elevato e stato sollecitazioni → scorrimenti a 45° (sull'orizzontale) che provocano degli strati vuoti (distacchi di materiali) ≡ prolungamento fessura a ZIG ZAG finché non è così ridotta da collassare (rimuovendo il fenomeno via via all'apice)



Si propaga proprio perché manca la sezione resistente per scorrimento plastico macroscopico a 45°.
 La fessura centrale si forma per nucleazione e crescita di cavità interne dovute all'interazione.

Sulla nostra particella insistono delle dislocazioni (energia elastica) e provocano il distacco dalla matrice, le cavità coalescono e formano la fessura.

L'energia per nucleare è data dalle dislocazioni, che quando si eguaglia l'energia libera per creare nuove superfici esse si possono nucleare.

La Deformazione critica per nucleare una cavità = $\left(\frac{\gamma}{4GR}\right)^{\frac{1}{2}} = E$
 (raggio)

Nucleazione: l'energia potenziale (elastica) associata alle dislocazioni che circondano

tanto più grosse le particelle tanto più piccola E necessaria per nucleare la fessura

Analogamente per la tensione

Se le particelle sono grosse la tensione e la deformazione critiche sono basse piccole → maggiore resistenza materiale avendo tensione e deformazione maggiori

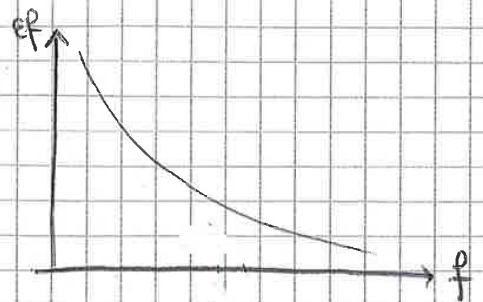
(maggiore f, minore τ e deformazione)

$$\tau = \tau_0 + (CG\gamma)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{d}{R}\right)^{\frac{2}{3}} \quad f_i \text{ frazione volumetrica}$$

Una volta che la cavità è nucleata si deve propagare (per propagare la cavità)

Crescita: l'allungamento ϵ_f dipende da f per propagare fino a rottura

Quindi dipende da f e R (dimensioni)



H₂

come visto prec.

(54)

Fra tura fragile fenomeni di sfaldatura (chiaggio) transcristallina

Un materiale con struttura esagonale o c.c.c. può essere facilmente spezzato facendo penetrare a temperature molto basse e poca energia, ma un unico lungo piano fragile ((0001) o (100))

NON è nei materiali a reticolo CFC

- 1) Obiettivo: non far muovere le dislocazioni
 La frattura avviene proprio scollando i piani, sfaldando i piani, favorita da T basse con poche vacanze e poco assorbimento di energia (più vetro)
 I piani di frattura sono quelli dove le dislocazioni NON riescono a muoversi (0001) (100) (100) = facce del cubo: le dislocazioni NON possono muoversi qui → piani di sfaldatura

Tensione critica necessaria per iniziare la deformazione plastica (o dislocazioni)

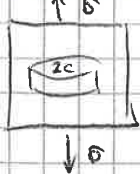
MECCANISMO DI GRIFFITH

→ H_p la presenza di fessure interne al materiale

per il carico teorico di frattura dobbiamo rompere i legami e creare nuove superfici, prendendo l'energia dalle dislocazioni (in elastico) $\sigma_t = \sqrt{\frac{E\gamma}{a}}$

Ma i carichi TEORICI hanno con valori di decine di migliaia di mega Pascal NON comparabili ai valori sperimentali per cui H_p

fessura ellittica



$2c \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \equiv \sqrt{\frac{E\gamma}{a}}$ ↔ FRATTURA

↑ valore estremità fessura ↑ carico teorico

→ $\sigma_{FRATTURA} = \left(\frac{8E\gamma}{4ac} \right)^{\frac{1}{2}}$

Le dislocazioni assorbono molta energia dalle fessure in movimento poiché quando vi è una intersezione fessura - dislocazioni si formano delle fessure delle **TACCHE** che ostacolano il moto

Avendo 2 dislocazioni che si intersecano A e B: sulla dislocazione B si aggiunge un pezzo: si allunga di una quantità pari al vettore di burger di A, analogamente A

Cio' comporta problemi poiché non si sa la direzione di propagazione del nuovo pezzettino
 Ad esempio se sono 2 dislocazioni a vite \rightarrow si crea uno a spirale il cui MOTO NON è permesso

Quindi quando una dislocazione incontra un'altra dislocazione il moto è fortemente rallentato

Analogamente quando una dislocazione interseca una fessura (o MACRODISLOCAZIONE) e sulla fessura si creano delle **TACCHE** che ostacolano il moto.

DIMENSIONI DEI GRANI

quando una fessura si attraversa un grano dovrebbe andar a finire nel cristallo adiacente attraversando lo spazio adiacente

ostacolo alla progressione della fessura

Bordi di grano

generalmente i piani di spaldatura di 2 cristalli adiacenti non sono allineati. La fessura deve generare degli scalini per attraversare il bordo

$$\text{Resistenza alla frattura} = f \left(\frac{1}{\sqrt{d_{\text{grano}}}} \right)$$

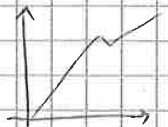
Tanto più il grano è piccolo tanto più la frattura è ostacolata

La resistenza alla frattura è INV. PROP secondo \sqrt{d} alle grandezze dei grani

Grani piccoli \rightarrow maggiore resistenza

Hp Grani piccoli (sotto una certa criticità)

Grani piccoli: **FRATTURA A PROPAGAZIONE LIMITATA** :



è necessario che nel grano accanto si nuclea una nuova frattura e così via ...
 le varie fratture si uniscono tra di loro

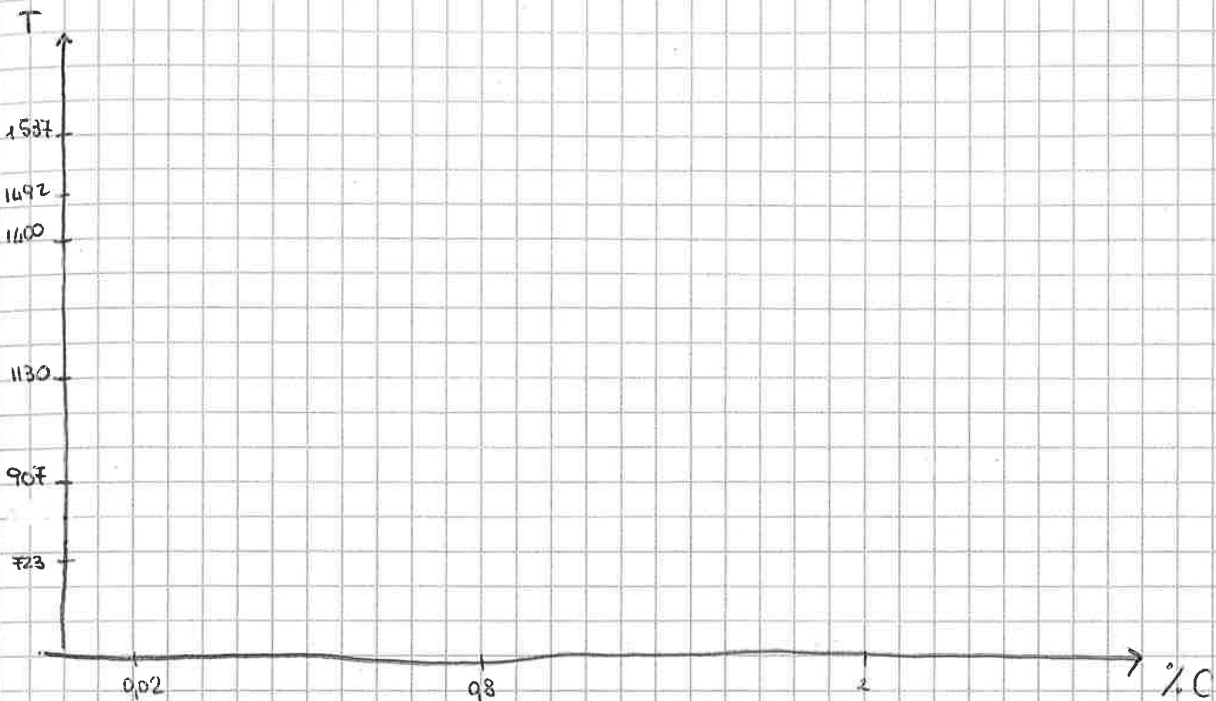
Il carico di rottura e di snervamento sono separati e chiaramente nella curva ci saranno tanti dentini che corrispondono alla nucleazione avvenuta
 snervamento \neq rottura + micro-fratture

Grano grosso: **FRATTURA A NUCEAZIONE LIMITATA**

Se il grano è di grosse dimensioni al limite basta 1 frattura (la 1° che si nuclea) la quale si attraversa tutto il materiale

δ snervamento \equiv δ rottura senza tratto plastico

Diagramma di Stato



(Diagramma binario ferro-carbonio isobari con 2 fattori chimici indipendenti, 1 parametro T)

3 punti notevoli (in varianza zero: ovvero con 3 fasi comprese):

- PERITETICO
- EUTETICO
- EUTETIOIDE

PERITETICA fase solido (assente 0,18%) che al riscaldamento si origina la ferrite con 0,1% e liquido con 0,5% di C

interviene nella SOLIDIFICAZIONE degli acciai

2 problematiche: gradienti termici → struttura a pallizzata dendritica
 fenomeni segregativi → perché, anche se come microscopico diagramma avviene a 1492° la ferrite reagisce con il liquido per darci un solido al 0,18% di C
 in realtà c'è il salto del peritettico (avremo una superficie esterna povera in C e un cuore ricco di C e altri elementi)

risolvibili con
 trattamenti da ricottura (alla più alta T possibile 1400°C^{max} anche per 1 settimana) per non avere la problematicità che possono essere ridotte anche se colate in continua e riduce la problematicità che invece persiste nelle colate a lingotti

→ caratteristiche meccaniche povere

- 1) Dato che NON va ancora bene: aggiungiamo **Silicio** che aumenta l'attività del carbonio, facendo sì che esso si comporti come se ce ne fosse di più dell'effettivo quantitativo.
Ogni 3 parti di Si, il C si comporta come se ce ne fosse 1 in più: C_{eq} (USALDAIURE)

$$C_{eq} = \% C_{eff} + \frac{1}{3} \% Si \quad (\text{avere } 3\% \text{ di Si} \rightarrow \text{avere } 1\% \text{ di C in più})$$

Con una ghisa di 3,4 effettivo di C + 3,1 di Si = (4,3) eq di C = ghisa di composizione eutettica
permettendo di avere i vantaggi di avere una ghisa eutettica

(bassa temperatura ed assenza di intervallo di solidificazione)

- 2) La ricerca di ottenere Grafite in forma di dischi con sezione lamellare (GHISA LAMELLARE)

(sottoforma di ferrolega 0,1% di Si)

INOCULAZIONE

prima della solidificazione aggiungo polvere di silicio all'atto della colata

questi crani di silicio gradualmente si comportano come se fosse IPER EUTETTICA
Creando attività carbonio, la prima fase che solidifica è la GRAFITE che si dispone
sotto forma di dischi con sezione lamellare (grafite di tipo d)

Ma il carbonio è andato a finire nella grafite; non siamo più in condizioni per cui al 2% si forma austenite ma ne rimane tutto perfettamente l'austenite che solidifica è quasi allo 0,8% di C; questa differenza tra 0,8% e 2% va a finire nella grafite

Quando solidifica: **Perlite**: struttura perlitica di ferrite e cementite formata dall'austenite al 0,8% eutettoidica + lamelle di grafite

(Foto di diversi campioni al microscopio)

- Se raffreddamento lento e 1% Si elasto → tolgo tutto il carbonio all'austenite

con tutta la grafite sulla matrice non più perlitica ma ferritica
(cristalli bianchi ferritici + ghisa lamellare)

vantaggi: maggiore deformabilità e maggiore resistenza alla corrosione

- Ghisa lamellare grigia → ok per molte applicazioni ma allungando nullo con lamelle con fattore di intaglio circa a 11 → fragile

Per migliorare le caratteristiche: **METODO DI SFEROIDIZZAZIONE**:

per la ghisa sferoidale:

II INOCULAZIONE 0,1% di Magnesio/Cerio/lanthanidi/terre rare:

elementi che intervengono nell'energia superficiale della grafite
(che sta solidificando) favorendo la curvatura.

(spesso struttura a occhio di bue: ferrite bianca + ● di grafite)

vantaggio: fattore intensificazione degli sforzi è 3 (e non 11)

EUTETTOIDE

l'austenite si trasforma in cementite e ferrite originando una miscela meccanica contenente 11% di cementite e 89% di ferrite detta Percite

L'austenite	contiene lo	0,8% C] →	è una trasformazione principalmente governata dalla diffusione che provoca la nucleazione e crescita di ferrite e cementite
La ferrite		0,02% C		
Cementite		6,6% C		

(10)

Essendo controllate dalla diffusione è come essere controllate da tempo e temperatura (esponenzialmente)

↓

ISTERESI : la trasformazione che per il diagramma FeC dovrebbe avvenire a 723°C avviene in tempi lunghi
 Ma se raffreddiamo la trasformazione avviene a T più basse :
 aumenta NUCLEAZIONE → grani fini e aumento caratteristiche meccaniche
 diminuisce crescita

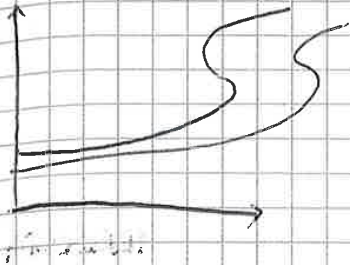
MA arrivati ad un certo punto NON avviene più la trasformazione

↓

MARTENSITE o AUSTENITE residua metastabile

↓

riavvicinamento per renderlo utilizzabile



spostando a destra mi rallentano la velocità di trasformazione dell'austenite
 o stabilizzando l'austenite con elementi austenizzanti (es. Nichel Carbono Rame)

o con elementi ferritizzanti o stabilizzanti dei carburi (Cromo Titanio Vanadio Tungsteno ...) che avendo alta affinità con il carbonio (rispetto al ferro) e quindi l'austenite tende a trasformarsi in Ferrite + Carburo

ma non di Cementite ma degli altri elementi

Quindi con la diffusione è necessario che avvenga la diffusione anche di questi elementi, che però è lenta essendo essi estranei.

es acciaio 0.4% C → unica possibilità è la tempera in acqua
 + 1% Cr → tempera in OIL

Ma l'uso di queste curve, per se esteso, è improprio (sono ISOTERME)
 Si dovrebbero usare le **CURVE CCT** a raffreddamento Continuo

Continuous Cooling Transformation

Che sono meno severe rispetto alle TTT (sono più spostate in BASSO e a destra)

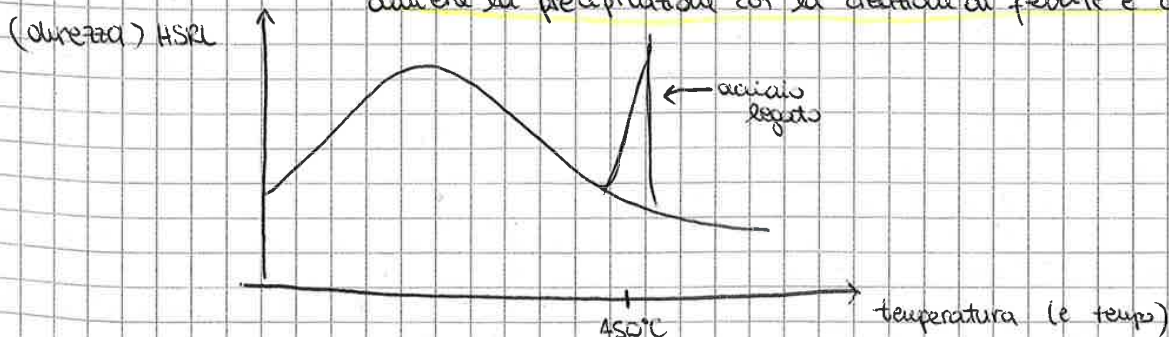
Se l'austenite raffreddando abbiamo come ottenuto martensite + austenite residua → troppo fragile

RINVENIMENTO: riscaldare il materiale ad una T ($\sim 500 + 600^\circ\text{C}$) al di sotto della temperatura di austenizzazione
 Generalmente, soprattutto nei gli acciai legati, è un processo che si ripete più volte

I STADIO ($0 + 150^\circ\text{C}$): l'austenite residua si trasforma in martensite

II STADIO

La martensite, ricca di Carbonio, perde carbonio e forma dei carburi metastabili (χ e ϵ) (che non sono di equilibrio e quindi non sono presenti sul diagramma Fe-C) ma sono **COERENTI** ed estremamente puri, con l'aumentare del riscaldamento i carburi sono riassorbiti dalla matrice (la durezza scende) e avviene la precipitazione con la creazione di ferrite e cementite



Nel caso degli acciai FRAGILITÀ DA RINVENIMENTO:

all'aumentare della temperatura dovrebbe aumentare la tenacità, diminuendo la durezza.

MA

per molti acciai tra 200°C e 300°C la fragilità aumenta invece di diminuire;

ci sono varie ipotesi sul motivo, tra cui che:

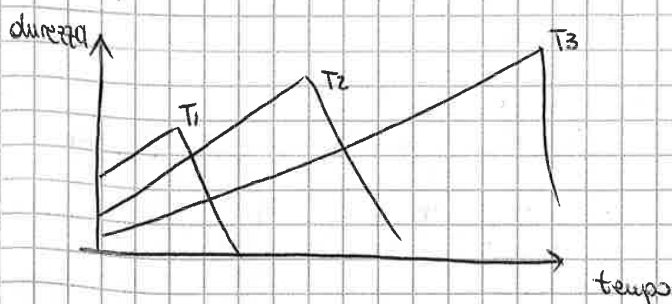
probabilmente, la precipitazione dei Carburi χ ed ϵ (metastabili) provoca una ricristallizzazione della matrice (pre-martensitica e fortemente tensionata) non facendola essere più tensionata.

oppure che non provochi automaticamente il DETENSIONAMENTO della matrice e quindi essa rimane tensionata.

(l'ideale è non stare in questo intervallo)

oppure che

Nella maggior parte degli acciai legati (specialmente se da bonifica) 0,2% Molibdeno (molto affine al Carbonio) che partecipa la loro precipitazione a T maggiori, permettendo alla matrice di distendersi.



$$T_1 < T_2 < T_3$$