



centroappunti.it

CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2493A

ANNO: 2020

A P P U N T I

STUDENTE: Jonathan Epifani

MATERIA: Appunti di Metallurgia + Database domande di esame - Prof. Scavino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

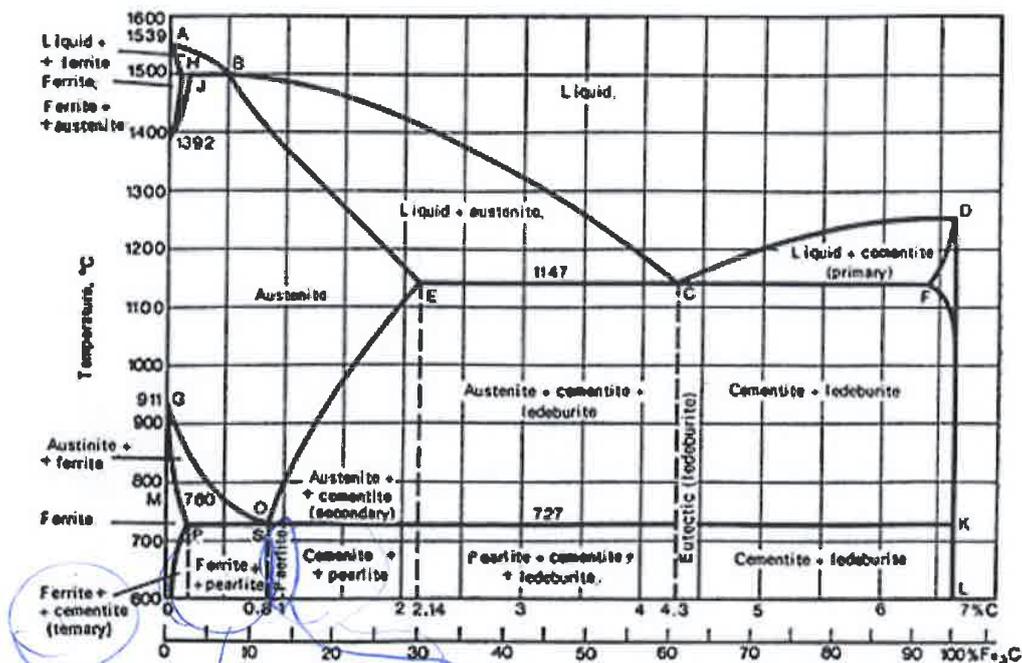
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

APPUNTI DI METALLURGIA

+

DATABASE DOMANDE ESAME

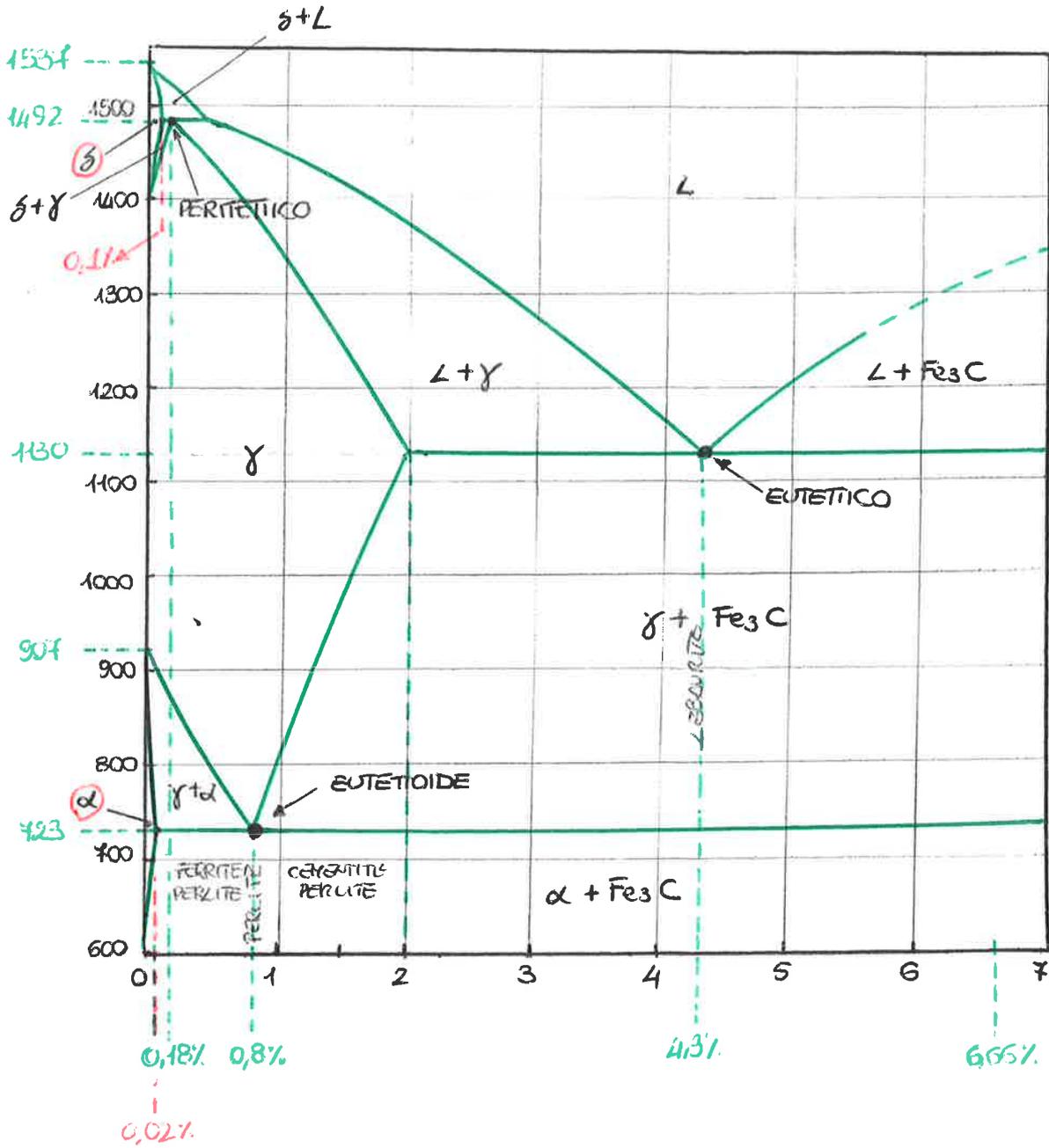


*Normalizzazione
reattura
RINVENIMENTO
MARTENSITE → α + cementite*

Jonathan Epifani

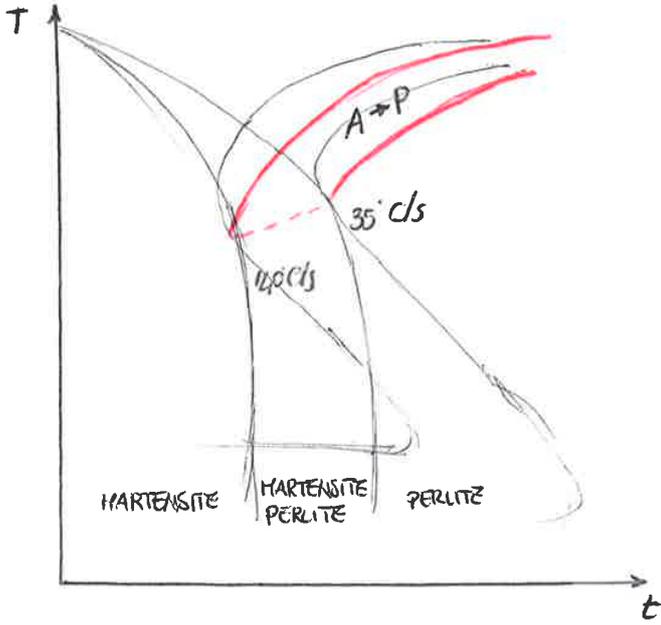
*ferrite 12%
cementite 88%*

*BAINITE
ferrite + cementite
spherulite (ago)*

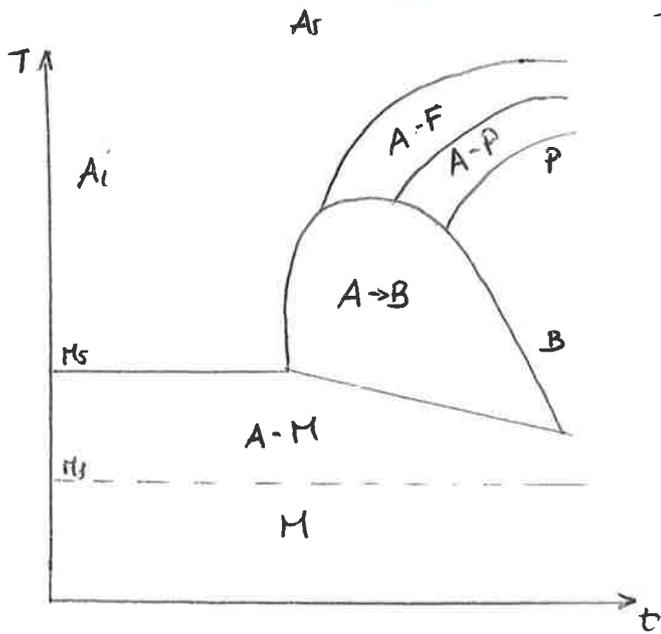


$$\frac{0,8 - 0,0002}{6,67} \cdot 100$$

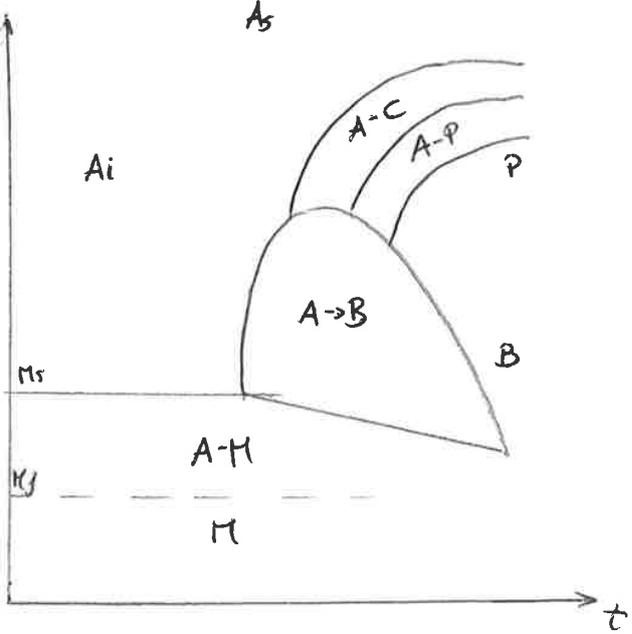
CIT EUTETOIDICO



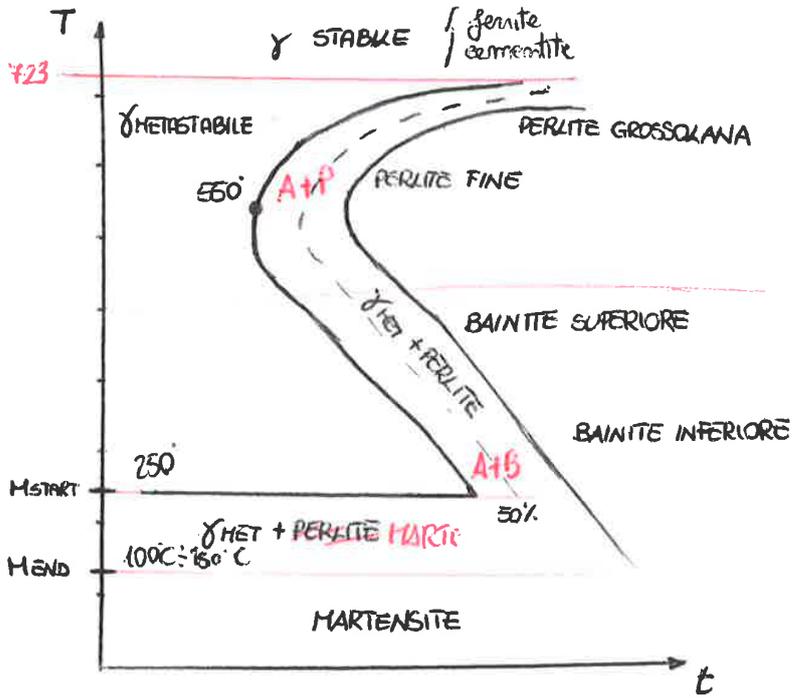
CIT IPOEUTETOIDICO



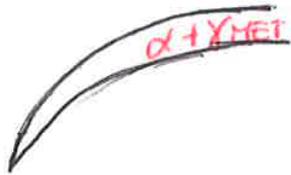
CTI IPEREUTETOIDICO



TTT EUTETOIDICO



TTT IPOEUTETOIDICO 0,35%



$M_s = 600^\circ\text{C}$
 $M_f = 100^\circ\text{C} \div 150^\circ\text{C}$

TTT IPER EUTETOIDICO >0,8%



$M_s = 200^\circ\text{C}$
 $M_f = 100^\circ\text{C}$

COS'E' UN MATERIALE METALLICO?

La **metallurgia** è la disciplina tecnica che riguarda essenzialmente lo studio dei metalli, del loro comportamento e dei procedimenti tecnici relativi al loro ottenimento e lavorazione.

I materiali metallici sono costituiti o da metalli puri ("assolutissimamente rari") o leghe: un materiale che ha caratteristiche metalliche formata da più componenti tra i quali oltre che un metallo può anche esserci un non metallo.

I materiali metallici si distinguono in:

- **metalli puri**, rarissimi e di nessuna utilità, poiché hanno delle caratteristiche meccaniche bassissime e scarse applicazioni;
- **leghe**, sono materiali con caratteristiche metalliche formati da più componenti, cioè da un metallo e da un non metallo, detto metalloide. Non sempre metallo + non metallo formano una lega.

Ferrolega: materiale con comportamento metallico

L'**acciaio** è la ferrolega più comune, formata da **ferro** e **carbonio** e in **parti minori** da **manganese** e **silicio**, già presenti nel minerale.

Fino al 2% di C si parla di acciaio

Oltre il 2% di C si parla di ghisa

Tuttavia, aggiungendo altri elementi, si possono ottenere acciaio con tenori di carbonio superiori al 2% e ghise con tenori di carbonio minori del 2%.

Nel campo aerospaziale, sono molto diffuse le leghe di alluminio, sia con metalli sia con non metalli (ex. lega di alluminio e silicio).

Non sempre l'unione di un metallo e di un non metallo dà origine a una lega, ma dipende dalle caratteristiche del prodotto finale, cioè da come si comporta tale materiale.

Distinguiamo, infatti, le leghe dagli ossidi (NON SONO LEGHE), materiali formati dall'unione di ossigeno O e di un metallo.

Esempi di **ossidi** sono:

Fe₂O₃: Ematite

Fe₃O₄: Magnetite

FeO: Wustite

Al₂O₃: Allumina

TiO₂: diossido di Titanio

Essi **non possono essere considerati materiali metallici**, in quanto privi delle caratteristiche che rendono tale un materiale metallico.

Infatti, i materiali metallici hanno caratteristiche specifiche.

poiché presenta carichi critici molto elevati, cosa che invece non accade negli altri materiali, dove si assiste a fenomeni di rottura per carichi molto inferiori.

In particolare, la deformabilità può essere controllata attraverso dei meccanismi di rafforzamento, quali i trattamenti termici (trattamento superficiale).

Tra le **lavorazioni a deformazione plastica** ricordiamo la **laminazione**, la **trafilatura** e la **calandratura**.

Dopo aver realizzato un materiale per 1 deformazione plastica (produzione), bisogna effettuare un controllo della deformabilità, con successivi interventi di rafforzamento (trattamenti termici) e il successivo studio dei fenomeni di rottura.

COLABILITA'

È l'attitudine di un materiale a riempire completamente un contenitore di qualsiasi forma una volta allo stato liquido. Le ghise hanno un'elevata colabilità e possono essere gettate in stampi con forma pressoché definitiva.

RICICLABILITA'

Non è una proprietà esclusiva dei materiali metallici (anche i vetri sono riciclabili);

PROPRIETA' MAGNETICHE

PRODUZIONE MANUFATTI: laminazione, estrusione, calandratura, stampaggio, ecc...

CONDUCIBILITA' ELETTRICA

I materiali metallici sono **ottimi conduttori elettrici**.

Essi sono caratterizzati da una **conducibilità di tipo ionico**, tipica anche dei non metalli, e da una **conducibilità di tipo elettronico**, tipica dei materiali metallici. Quest'ultima è resa possibile dalla presenza del legame metallico.

CONDUCIBILITA' TERMICA

I materiali metallici sono **ottimi conduttori di calore** grazie alla presenza di **elettroni liberi** di muoversi (agitazione termica), caratteristica tipica del legame metallico. Le due conducibilità sono caratteristiche molto utilizzate a livello tecnologico.

Tuttavia, bisogna trovare il giusto compromesso fra tutte queste caratteristiche. Ad esempio, se un materiale è troppo deformabile, non è abbastanza resistente. Un miglioramento si ha, ad esempio, con i meccanismi di rafforzamento, che riducono la deformabilità pratica e permettono di operare in maggiore sicurezza.

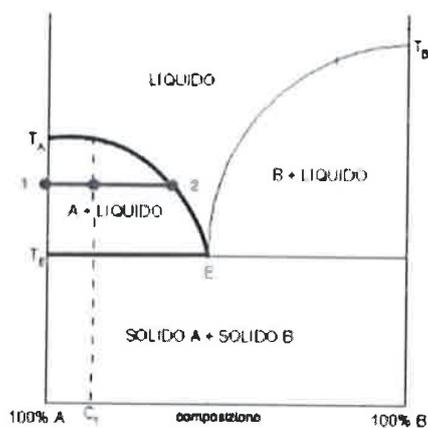
metallica di rame e stagno, rame e alluminio, rame e zinco (ottoni). Solo nel 1200 a.C. si cominciò ad usare il ferro.

Per permettere il passaggio di elettroni, il metallo deve essere il più puro possibile e con il minor numero di vacanze.

Il rame puro è molto costoso e nei secoli scorsi, ciò che si otteneva per fusione dei minerali era altamente impuro, con una conducibilità elettrica limitata.

Per **purificare il rame**, si parte da quello impuro e con diverse tecniche si procede con la **raffinazione**.

La prima tecnica è la **fusione a zone**, che si basa sul presupposto che se vi sono un liquido e un solido a contatto, le altre sostanze presenti si concentrano nella fase liquida.



Per studiare tale tecnica, analizziamo prima un diagramma di stato binario con eutettico: le curve delimitano il campo di esistenza della fase liquida e della fase liquida in equilibrio con quella solida, mentre una retta delimita il campo di esistenza dello stato solido. Come si nota dal grafico, relativo a componenti immiscibili allo stato solido e completamente miscibili allo stato liquido, i punti TA e TB sono rispettivamente la temperatura di fusione di un generico solido A e la temperatura di fusione di un generico solido B; rappresentano l'origine delle curve. La retta che tocca il punto E, punto caratteristico e definito **punto eutettico**, ha intercetta sul valore TE e delimita il campo di esistenza dello stato solido. L'asse delle ascisse

rappresenta la composizione percentuale in peso e ai due estremi si ha, rispettivamente, da sinistra verso destra il componente B puro e da destra verso sinistra il componente A puro.

Immaginiamo di essere nella condizione C1, con rame (componente A) molto vicino alla purezza e allo stato solido e altre sostanze (componente B), allo stato liquido. Quindi, vi è la coesistenza di rame puro solido e altre sostanze in forma liquida. Se ci manteniamo tra le due linee nere, le eventuali impurezze presenti si concentreranno nella fase liquida e possono essere facilmente eliminate, ottenendo così un solido formato dal 100% di rame puro.



La fusione a zone può essere effettuata attraverso lo **scaldamento ad induzione**: utilizzando un induttore, si riscalda una porzione ristretta del materiale ben localizzata da cui si vogliono eliminare le impurità. In questo modo, riscaldando il materiale, le impurità andranno a posizionarsi nella zona in cui si è formato del

liquido; spostando l'induttore, le impurità saranno trascinate con esso e l'operazione verrà ripetuta fino all'estremità del pezzo.

Nell'ambito della conduzione elettrica, oltre il rame, si utilizzano anche metalli preziosi come l'**oro** e il **platino**: essi, infatti, presentano una velocità di **ossidazione** così bassa rispetto agli altri materiali che può essere praticamente considerata **trascurabile**.

Solo i gas nobili non si ossidano, perché non formano legami chimici.

Tale proprietà è molto utile in ambito elettronico, poiché spesso nelle giunzioni di telefoni, computer, etc, si forma dell'ossido, che compromette il funzionamento dell'apparecchio stesso. Ciò può portare a conseguenze catastrofiche (si pensi ai computer di bordo di un aereo o in campo medico e finanziario) e per evitarle, si utilizzano tali metalli preziosi, che conducono bene la corrente e hanno basse resistenze. Il rame stesso forma due ossidi, Cu_2O e CuO , che non conducono bene la corrente e danneggerebbero il dispositivo.

Tuttavia, non si possono realizzare impianti elettrici in oro, poiché esso ha una resistenza meccanica bassissima (si romperebbe subito) e necessita l'aggiunta di altri materiali, come argento e rame, oppure l'utilizzo di canaline per l'appoggio dei fili.

Negli elettrodotti per il trasferimento di elevate potenze elettriche, si utilizza quindi l'alluminio. Sebbene l'alluminio abbia una resistività specifica ($\approx 2,75 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) maggiore di quella del rame ($\approx 1,68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$), esso ha un peso proprio molto minore a quello del rame ($\approx 2750 \text{ kg/m}^3$).

Ricapitolando, la conducibilità elettrica è affidata a:

- rame, nel caso dell'elettrotecnica e dei circuiti elettrici;
- oro e titanio, per prevenire il fenomeno dell'ossidazione nelle apparecchiature elettroniche;
- alluminio, per il trasferimento di grandi potenze elettriche.

Ricordiamo che i materiali metallici sono prodotti a partire da ossidi: scaldando il minerale, si separa il metallo dall'ossigeno.

Il materiale subisce delle interazioni (di tipo ossidativo), all'aumentare della temperatura ci sono due fenomeni:

- Di tipo termodinamico: se T aumenta si ha formazione di ossidi (questa situazione è sfavorita, sono meno stabili gli ossidi)
- Di tipo cinetico: aumentando T aumenta L'AGITAZIONE MOLECOLARE E QUINDI SI ESPANDONO.

Gli ossidi possono avere una funzione protettiva nei confronti del materiale SOTTOSTANTE oppure no (es. quando è poroso).

Alle medio-basse temperatura vanno bene acciai e ghise, ad alte T si fa ricorso a super-leghe. (resistenza meccanica alle alte T e alla corrosione).

Il rame non soffre di questa vulnerabilità.

CORROSIONE ELETTROCHIMICA

Se la corrosione avviene tra due parti metalliche poste a contatto; se i metalli posti a contatto sono di natura differente, si parla in particolare di **corrosione galvanica**.

La corrosione elettrochimica è essenzialmente il meccanismo della pila, formata da un anodo, un catodo e un elettrolita.

Quando due fasi (la fase è una porzione di volume fisicamente e chimicamente omogenea) vengono a contatto, si ha la possibilità di creare una pila, detta pila di corrosione, in presenza di un elettrolita (non necessariamente liquido, basta anche l'umidità).

Nella zona di contatto si hanno due reazioni principali, una all'anodo ed una al catodo:

- Le **reazioni anodiche** sono sempre reazioni di ossidazione che tendono a distruggere il metallo dell'anodo che si discioglie come ione.
- Le **reazioni catodiche** sono invece sempre reazioni di riduzione di alcuni ioni con corrispondente consumo degli elettroni prodotti della reazione anodica e transitati attraverso il metallo.

All'interno di un materiale possono esserci più fasi, come nell'**acciaio**, formato da **ferro e carbonio**. Una parte di carbonio si scioglie nel reticolo del ferro, dando origine a una soluzione solida omogenea, cioè uniforme in ogni suo punto e si ha un'unica fase.

La **solubilità del carbonio**, a **temperatura ambiente**, è dello **0,02%** (cella elementare CCC), **ma** il tenore di carbonio presente negli acciai è dell'ordine del **2%**: ciò che il carbonio dà origine a una **seconda fase**.

Nel caso delle **ghise** il carbonio è presente sotto forma di **grafite**, mentre negli **acciai** il carbonio è presente sotto forma di **carburi**, in particolare sotto forma di **cementite Fe₃C**.

In un acciaio vi sono sempre due fasi: la soluzione solida di ferro e carbonio e la cementite.

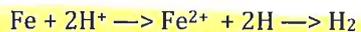
Vi sono, quindi, un anodo e un catodo, che possono dar vita ad una azione corrosiva di tipo elettrolitico.

Nei metalli, si distinguono due comportamenti elettrochimici:

- il **comportamento elettrochimico attivo** è caratteristico di quei metalli, come l'**acciaio al carbonio**, che ossidandosi danno origine a prodotti di corrosione insolubili (ad esempio **ruggine**), che una volta depositati sul materiale formano un **film spugnoso** e poco compatto, inadatto a impedire il processo anodico e pertanto a passivare il sottostante metallo;
- il **comportamento elettrochimico passivo** è caratteristico di quei metalli, come l'**acciaio inossidabile**, che ossidandosi danno origine a prodotti di corrosione insolubili che formano un sottile strato compatto e continuo capace di impedire il processo anodico e di conseguenza la corrosione del materiale sottostante.

Danneggiamento da idrogeno

Nel campo dei fenomeni elettrochimici, oltre all'azione corrosiva, si ha anche sviluppo di **idrogeno**:



Infatti, una soluzione acquosa comporta lo sviluppo d'idrogeno in una reazione elettrochimica.

Essendo l'idrogeno un elemento piccolo, esso può penetrare facilmente nei materiali, sottoforma atomica: esso può essere rimosso attraverso la **deidrogenazione**. Se ciò non avviene, esso si posiziona nei **bordi di grano**, nelle **vacanze** o nelle **dislocazioni**, che sono difetti superficiali, puntuali e lineari dei metalli. Essi sono anche chiamate trappole e qui l'idrogeno atomico assume la forma molecolare biatomica: $2\text{H} \longrightarrow \text{H}_2$.

A tale reazione è associato, però, un **aumento di volume** che causa il **tensionamento** del materiale fino al punto di **rottura**. Quindi, oltre alla corrosione, vi è anche l'infragilimento del materiale.

La **dreidrogenazione** deve essere effettuata **prima** che l'idrogeno entri nelle **trappole**, cioè al massimo una o due ore dal momento del rilevamento della presenza di idrogeno.

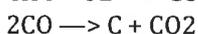
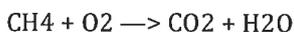
Il materiale viene riscaldato fra i **180 °C e i 200 °C**, per gli ingranaggi piccoli e gli acciai, per un tempo che va dalle **4 - 5 ore alle 48 ore**, per i pezzi di uso aeronautico. Infatti, scaldando il materiale, l'idrogeno va via. Ovviamente, la **temperatura** e il **tempo** variano con le **dimensioni del pezzo**: un grande lingotto necessita di una temperatura di **600 °C** e circa una settimana di tempo.

Ci sono molti modi nei quali può **entrare** dell'Idrogeno nel materiale: per esempio tutte le volte che facciamo una **galvanizzazione** c'è una scarica catodica dell'idrogeno oppure $\text{H}_2\text{O}(\text{vapore}) + \text{calore} \rightarrow 2\text{H} +$ detto: Cracking delle molecole d'acqua. Il calore può facilmente venire apportato da trattamenti termici come le saldature, e H_2 può venire da reazioni chimiche come la combustione.

L'idrogeno può penetrare in un materiale anche quando si hanno processi di **elettrodeposizione o processi galvanici**, come **zincatura, cromatura, nichelatura, cadmiatura, etc**, attraverso i quali si deposita un materiale su un componente e durante i quali, l'idrogeno si scarica sempre al catodo.

Anche nei processi di **deformazione a caldo o a freddo**, con l'utilizzo di acido solforico o cloridrico per l'eliminazione dello strato di ruggine o di ossido, vi è lo sviluppo di ossigeno.

Lo sviluppo di idrogeno può anche avvenire quando si ha un pezzo incandescente in presenza di vapore acqueo: ad alte temperature (come accade nelle saldature o nei trattamenti termici) avviene il cracking (rottura) della **molecola d'acqua**, che comporta lo sviluppo di idrogeno, che entra nel materiale:



Nel configurazione CFC, lo spazio libero è 5 volte maggiore di quello CCC: l'interno è vuoto e quindi l'idrogeno può essere facilmente assorbito dalla cella. Esso, inoltre, crea meno danni, anche se entra sottoforma molecolare, perché ha più spazio a disposizione. Ciò si collega alla solubilità del carbonio nel ferro: nella configurazione CFC, essa è del 2%, contro lo 0,02% della configurazione CCC.

La configurazione CFC del ferro si ha ad alte temperature: circa a 700°C si ha la transizione da CCC a CFC, con conseguenti variazioni di volume, che non avvengono in maniera omogenea e che possono creare tensionamenti e conseguenti rotture. Infatti, quando viene sottoposto a trattamenti termici, il cuore del materiale si riscalda (o raffredda) più tardi rispetto alla superficie; inoltre, quando il cuore si espande (o contrae), nel materiale si genera uno stato tensione di trazione (o di compressione) che causano la rottura del materiale.

Nella configurazione CCC, gli interstizi sono molto più piccoli rispetto alla configurazioni CFC: essa è molto più critica e più soggetta a rottura per idrogeno.

La peggiore soluzione di tutte sarebbe scegliere un materiale con celle in configurazione CCC e con resistenza superiore ai 900 MPa: sicuramente, i danni dovuti all'ingresso di idrogeno sarebbero gravissimi.

Le leghe 7000 di Al-Zn non sembrano essere naturalmente soggette a rottura da Idrogeno

Le leghe di alluminio e zinco 7000 sono molto usate in aeronautica, ma non in campo automobilistico.

Le leghe di serie 7000 presentano resistenze intorno ai 600-700 MPa e configurazioni di tipo CFC, però presentano dei precipitati intermetallici, le cui conseguenze non sono note. E' fondamentale, quindi, studiare il materiale nelle sue peggiori condizioni, cioè materiale non vergine, ma dopo che ha subito la deformazione. Se vi è la presenza di idrogeno, bisogna stabilire i carichi che portano a rottura il materiale e verificare cosa accade per carichi pari al 5-10% del carico di snervamento (molto utile in campo automobilistico). Si deve, inoltre, considerare la possibilità dell'elettrolisi dell'acqua, in cui il materiale funge da catodo, e verificare cosa accade in condizione di saturazione dell'idrogeno.

La suscettività o risposta di un materiale alla presenza di idrogeno può essere valutata con metodi diversi:

- si può appendere il materiale, metterlo in trazione e posizionare un carico al di sotto di esso: inserendo man mano idrogeno, si può studiare la sua reazione;
- si può usare il metodo U-band, che prevede di piegare una lamiera a forma di U, imbullonarla e usarla come catodo immergendola in una soluzione, dove si ha la scarica di idrogeno.
- l'ultimo metodo prevede l'uso di un anello con due fessure: il materiale viene inserito e trazonato fino ad una certa deformazione ϵ ed una certa tensione σ . Successivamente viene imbullonato a delle piastre e tolto dalla macchina, per mantenere lo stato di tensione, ed immerso in un fluido elettrolita, per studiarne il comportamento. L'acqua si scaricherà all'anodo, il metallo al catodo: $2H^+ \rightarrow 2e^- \rightarrow 2H$; $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2$. La liberazione di ossigeno non causa danni.

Gli strati sono sottilissimi e compatti e hanno un grande potere protettivo. Essi si creano con processi elettrochimici, che danno vita all'alluminio anodizzato.

Nel caso dell'Alluminio possiamo accrescere lo strato di ossido con reazioni elettrochimiche per motivi estetici o per migliorare la protezione (**Al anodizzato**)

Anodizzazione alluminio: processo elettrochimico, molto costoso.

*Nel caso degli acciai, non si può avere l'autopassivazione a causa della formazione degli ossidi di ferro. Tuttavia, si può ottenere un comportamento simile a quello dell'alluminio e del titanio solo se è presente un terzo elemento come il **cromo Cr**, in percentuali almeno **maggiori al 13%**.*

Il cromo è spesso presente in molti acciai perché è un materiale economico, ma la sua quantità varia fra il **3 e 4%**: in questo caso, lo scopo della sua presenza è **l'agevolazione del processo di tempra**.

Per avere un **acciaio inossidabile**, il cromo deve dunque essere presente in tenori maggiori del 13% perché in queste condizioni si forma uno **spinello**, cioè un ossido formato da una parte bivalente e una parte trivalente: $\text{FeO} \cdot (\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$. Questo composto sostituisce completamente gli ossidi del ferro e si comporta come allumina o rutilo, **rendendo la superficie autopassivante, dando vita agli acciai inossidabili** (INOX o stainless steel).

Cromo in quantità > 13% → Acciaio inossidabile

Cromo in quantità < 13% → serve per la tempra e altre cose

Cromo è cancerogeno.

La velocità di ossidazione è più veloce rispetto agli acciai.

Solitamente si tiene in considerazione un valore di **18%** come valore.

I manufatti in acciaio inox vengono giuntati mediante saldatura e bullonatura (i bulloni devono essere zincati)

Mettere a contatto l'acciaio inox con un materiale meno nobile determina l'innescio di celle galvaniche (si corrode il materiale meno nobile)

ACCIAI STABILIZZATI

Dato che il processo di eliminazione del carbonio è molto costoso, esso viene neutralizzato e reso meno nocivo con l'introduzione di **titanio, niobio o di vanadio**: questi tre elementi hanno un'affinità elettronica col carbonio maggiore di quella del cromo, e dunque si formeranno i carburi di titanio o di vanadio, dando vita ai cosiddetti **acciai stabilizzati** al titanio-niobiovanadio.

Se da un lato vi è lo svantaggio di aggiungere una seconda fase, dall'altro, si ha però una matrice inalterata in termini di tenore di cromo, e dunque resistente alla corrosione con resistenze di 200-300 MPa (marmitte).

Questi acciai (austenitici) resistono bene sia alle alte che alle basse temperature. Però non resistono bene alla stress corrosion, infatti sono soggetti a pitting (si formano buchetti sulla superficie del solido nei quali può penetrare il liquido corrosivo).

Comportamenti analoghi sono raggiungibili dagli **acciai ferritici**, in cui non vi è il nichel e il cromo è presente con tenori superiori al 15%: ciò rende questa famiglia di acciai meno costosi di quelli austenitici. Essi, però, non possono essere utilizzati a basse temperature, in quanto si rompono fragilmente, mentre reagiscono molto meglio degli austenitici alla stress corrosion. Sono utilizzati nella produzione di lavelli.

ACCIAI DUPLEX

Per unire le qualità di queste due famiglie sono stati creati degli **acciai duplex**, cioè acciai bifasici austeno-ferritici. Essendo presenti due fasi, si sacrifica un po' di resistenza a corrosione per guadagnare di resistenza alla stress corrosion. Si usano soprattutto per l'impiantistica

18 ÷ 32% Cr (tende a stabilizzare la microstruttura ferritica)
4,5 ÷ 7% Ni (però quella con < 4,5% Ni)
2,5 ÷ 4 Mo

ACCIAI MARTENSITICI

Infine, esistono anche gli acciai martensitici. La martensite è una fase metastabile formata da ferro e carbonio: mentre la ferrite e l'austenite sono fasi presenti nel diagramma di stato in condizioni di equilibrio, la martensite non è presente poiché non è una fase di equilibrio. Essa si ottiene violentando di fatto il sistema, ad esempio raffreddando velocemente a partire da alte temperature, non dando al carbonio il tempo necessario per diffondere e dare vita alla cementite. La martensite è una soluzione sovrassatura di carbonio, cioè è presente una quantità di carbonio superiore al valore termodinamicamente concesso ed ha un reticolo molto tensionato. In queste condizioni, la struttura cubica si deforma in una struttura tetragonale molto allungata, che contiene circa lo **0,2% di carbonio** (serve a deformare la ferrite e darà durezza) e dal 15 al 20% di cromo (serve per l'inossidabilità e la creazione dello spinello), mentre il nichel è totalmente assente. Sono acciai molto usati, ad esempio, nei coltelli, in quanto non devono essere soggetti all'azione della ruggine.

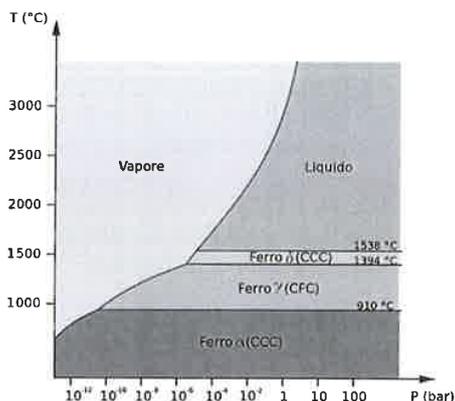
- resistenti allo scorrimento viscoso
- difficile formabilità e saldabilità
- bassa resistenza alla corrosione

WIKIPEDIA 1% C

Ferro

Il ferro puro (che in natura non esiste), allo stato solido presenta tre forme allotropiche:

- ferro α (ferrite alfa): struttura cristallina cubica a corpo centrato (CCC) con costante di cella 2.86 Å, stabile fino a 907 °C.
- ferro γ (ferrite gamma o austenite): struttura cristallina cubica a facce centrate (CFC) con costante di cella 3.65 Å, stabile tra 907 °C e 1400 °C.
- ferro δ (ferrite delta): struttura cristallina cubica a corpo centrato (CCC) con costante di cella 2.93 Å, stabile tra 1400 °C e 1537 °C (temperatura di fusione).



Queste tre forme allotropiche del ferro sono in grado, in misura diversa, di dar luogo a soluzioni solide con il carbonio, oltre che combinarsi con questo per formare la cementite. Nel diagramma le fasi presenti sono quindi le seguenti:

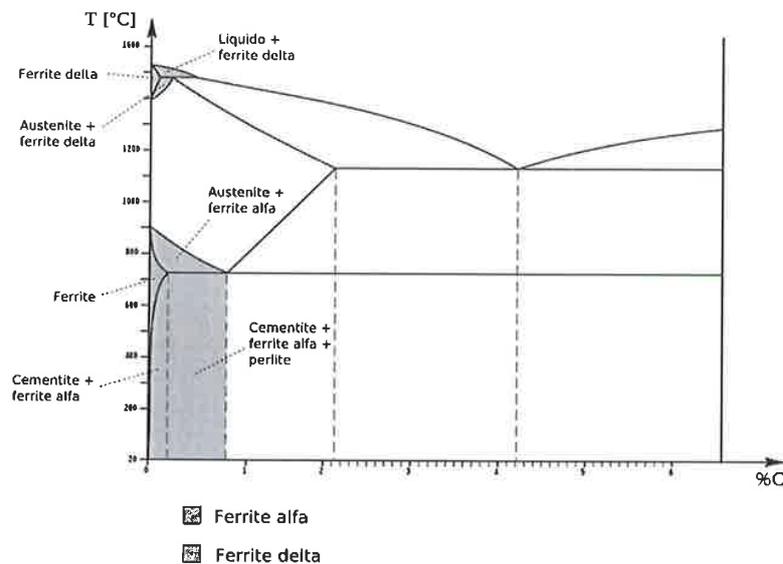
- **Fase α :** Ferrite. È la soluzione interstiziale formata da piccole quantità di carbonio nel reticolo CCC del ferro α . La presenza di atomi di carbonio nel reticolo CCC del ferro α produce delle notevoli distorsioni, per questo la solubilità del carbonio nel ferro α è molto limitata (come si evince dal diagramma) e può raggiungere un valore massimo dello 0.02% (a 727 °C).
- **Fase γ :** Austenite. È la soluzione solida interstiziale del carbonio nel ferro γ (cfc). La struttura cristallina del ferro γ , favorisce una maggiore solubilità del carbonio, dal diagramma si nota infatti un campo di stabilità dell'austenite decisamente più ampio
- **Fase δ :** È la soluzione interstiziale del carbonio nel ferro δ (ccc). Valgono per questa fase considerazioni analoghe a quelle fatte sulla ferrite α . La maggiore costante di cella consente tuttavia un lieve aumento della solubilità del carbonio.
- **Fase Fe₃C:** Cementite. È il composto intermetallico di cui si è già parlato sopra.

In genere, le varie forme allotropiche vengono indicate con lettere consecutive dell'alfabeto greco partendo dalla temperatura ambiente; nel caso del ferro viene saltata la lettera beta perché erroneamente essa era stata attribuita al ferro non magnetico presente a temperature comprese tra 768 °C (punto di Curie) e 910 °C

Differenza tra alfa (ferromagnetico) e beta (paramagnetica) sta nelle proprietà magnetiche.

Ferrite

In siderurgia la **ferrite** è una soluzione solida interstiziale costituita da carbonio solubilizzato in un reticolo cubico a corpo centrato di ferro (ferro alfa o ferro delta).



A seconda della temperatura alla quale si forma, la ferrite è denominata ferrite alfa oppure ferrite delta. La ferrite alfa e la ferrite delta contengono una bassa percentuale di carbonio al loro interno (fino allo 0,02% in peso per la ferrite alfa^[1] e fino allo 0,09% in peso per la ferrite delta^[2]), pertanto nel diagramma ferro-carbonio si trovano a sinistra dell'eutettoide perlitico. La ferrite delta può contenere più carbonio al suo interno rispetto alla ferrite alfa, in quanto presenta un valore più elevato della costante di reticolo,^[2] ovvero gli atomi di ferro che costituiscono il reticolo CCC della ferrite delta sono più distanziati rispetto agli atomi di ferro della ferrite alfa.

- La **ferrite alfa** si forma a temperature più basse, più precisamente fino a 911 °C. Si trova in forma satura a 723 °C, a questa temperatura riesce a sciogliere al suo interno lo 0,02% di carbonio.
- La **ferrite delta** si forma ad alte temperature, nell'intervallo tra i 1392 °C e i 1536 °C. Si trova in forma satura a 1493 °C e a questa temperatura riesce a sciogliere al suo interno lo 0,10% di carbonio.

SUPERLEGHE

Le **superleghe** sono una categoria di **leghe** metalliche molto ampia, progettate per conservare una buona **resistenza meccanica** ed alla **corrosione** anche a temperature intorno ai **1200 gradi °C**, molto utili in campo aeronautico e/o aerospaziale (sono impiegate per costruire le pale di **turbine per motori a reazione**).

Quelle più utilizzate attualmente sono le superleghe base nichel e di cobalto.

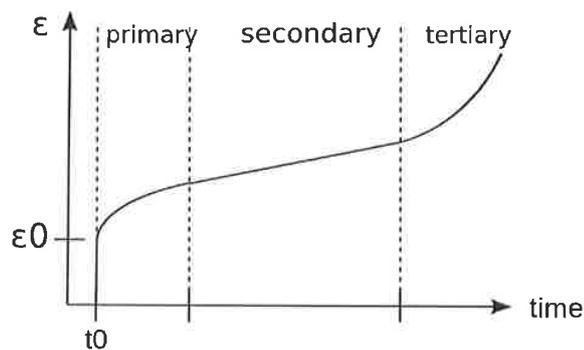
Le superleghe a matrice a base nichel o cobalto resistono allo scorrimento viscoso a caldo (creep).

Lo **scorrimento viscoso** (talvolta chiamato col termine inglese: *creep*) è la deformazione di un **materiale** sottoposto a sforzo costante che si verifica nei materiali mantenuti per lunghi periodi ad alta temperatura.

Lo scorrimento viscoso si manifesta al di sopra della temperatura di scorrimento (T_s), coincidente indicativamente con la temperatura di ricristallizzazione e approssimabile, in media, alla metà della temperatura di fusione misurata in kelvin.

Si possono distinguere tre fasi principali quando il processo avviene a $T > T_s$ e sollecitazione costante:

- *prima fase*: all'applicazione del carico si ha la deformazione elasto-plastica, che aumenta con velocità decrescente favorita dalla mobilità delle dislocazioni più favorevoli (segue una *curva logaritmica*);
- *seconda fase*: si stabilisce un equilibrio tra l'incrudimento e la ricristallizzazione: la deformazione prosegue a velocità quasi costante e bassa relativamente a quella presente nella fase successiva;
- *terza fase*: la deformazione aumenta rapidamente, arrivando velocemente alla rottura, a causa delle microcricche appuntite e dei microvuoti tondeggianti (nei punti di incontro di tre cristalli) e soprattutto dello scorrimento diffusivo dei giunti dei grani (cioè i grani si allungano per diffusione di atomi nella direzione della trazione e di vacanze nella direzione normale)



Corrosione elettrochimica

Elemento che cede elettroni, elemento anodico, si ossida = si corrode

$\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ si ossida = reazione anodica (ANODO)

$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$ si riduce = reazione catodica (CATODO)

$\text{Fe} + 2\text{H}^+ = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2$ (il ferro non resiste)

$\text{Cu} + 2\text{H}^+ = \text{Cu}^{2+} + \text{H}_2$ (reazione che non avviene)

Negli acciai comuni il carbonio

ACCIAIO: Fe / Fe₃C (cementite) anodo+catodo

Il carbonio ha due effetti negativi negli acciai:

- Affinità del carbonio con il cromo è maggiore Fe-C, quindi reagisce con il cromo (formando carburi di cromo) i carburi di cromo da problemi: - sottrae il cromo dalla matrice, - crea carburi di cromo. Risultato matrice povera di cromo a contatto con i carburi, quindi meno resistente, sensibilizzazione (evidente intorno ai 500-600 gradi) degli acciai inossidabili.

SALDATURA

Le proprietà *termiche* ed *elettriche* dei materiali metallici confluiscono nella saldabilità.

La saldatura è una tecnica di giunzione dei materiali metallici mediante la quale si crea un continuo (crea una continuità meccanica); essa prevede di arrivare alla fusione delle parti da giuntare e la successiva cosolidificazione.

Portare a fusione una ristretta parte di due o più componenti e poi farli cosolidificarli insieme.

Il calore necessario all'attuazione del processo viene ottenuto con diversi sistemi:

- Una fiamma prodotta per combustione di un gas con aria o ossigeno.
- Un arco elettrico che viene formato tra due elettrodi (uno di essi può essere il pezzo stesso).
- Resistenza elettrica ottenuta per effetto Joule al passaggio di una corrente attraverso i pezzi da saldare.
- Laser a elevata potenza o altri sistemi di apporto di energia non da fiamma.

La saldatura può avvenire anche con l'uso di un **metallo di apporto**: due pezzi di materiali metallici (sia differenti sia non) possono essere saldati introducendo fra essi un metallo di apporto, che unisce i due pezzi cosolidificandosi con loro. Viene chiamato anche cordone di saldatura (*filler*) e deve essere un metallo più nobile dei primi due perché, essendo una parte localizzata, l'azione corrosiva deve interessare i componenti e non il metallo d'apporto, che non deve corrodersi.

Si parla di **brasatura** quando arriva a fusione solo il metallo d'apporto e non gli altri due materiali metallici. In questo caso, il metallo d'apporto è più bassofondente rispetto ai due metalli che si devono giuntare: ne sono un esempio le leghe di stagno, di zinco, di argento che devono essere saldate con il rame, che fonde ad una temperatura di circa 1300 °C.

Un caso intermedio è la **saldobrasatura**, una tecnica di giunzione che prevede la fusione solo di uno dei due materiali: ne sono un esempio le leghe di alluminio, che fondono a circa 550 °C, saldate con le leghe di ferro, cioè acciaio, che fondono a circa 1300-1400 °C. La temperatura di fusione dell'alluminio è di 654°C, quella dell'acciaio 1537°C, quindi è logico che sia il solo alluminio a fondere.

Giunzione alluminio-acciaio (in campo aeronautico si utilizza la rivettatura).

Nel caso di saldatura tra Al e Fe il giunto è fragile ('la saldatura tiene poco'), quindi si utilizza la saldobrasatura.

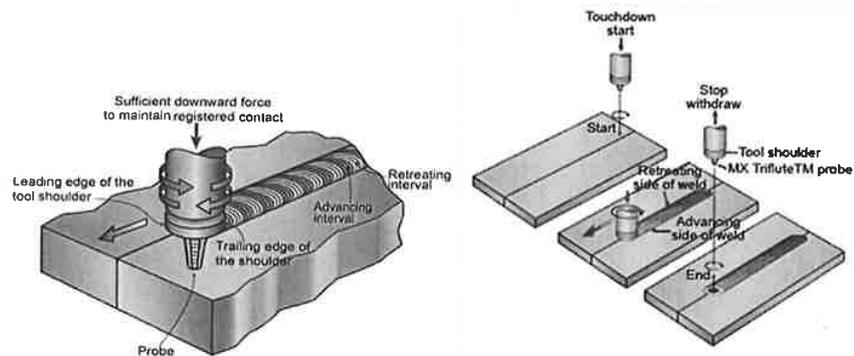
Spesso però non è possibile saldare le leghe di Al (temperature superiori a 180°C) o rischiamo di compromettere la resistenza meccanica) ??????

La **Friction Stir Welding (FSW)** è un tipo di saldatura per attrito allo stato solido in cui nel materiale da saldare non viene raggiunta la temperatura di fusione. La FSW è utilizzata principalmente per unire leghe d'alluminio altrimenti difficilmente saldabili con altre tecniche.

Il cordone di saldatura è formato da un utensile cilindrico. Questo ha un perno nella parte terminale che può presentare una filettatura. Il perno, ruotando genera attrito, quindi calore. Quest'ultimo rende plastico il materiale, che, ricristalizzandosi, unisce i due pezzi. La dimensione media dei grani ricristallizzati sarà molto piccola, facendo aumentare le caratteristiche meccaniche.

Le temperature che si raggiungono sono circa pari al 75 - 80% della temperatura di fusione. Si compenetrazione di metalli con solidificazione.

Nel settore aeronautico essa viene utilizzata per saldare leghe d'alluminio in sostituzione della rivettatura.



La domanda che ci poniamo ora è: quale tra acciaio ed alluminio è il materiale più facile da saldare?

Si arriva a fusione quando si riesce a fornire sufficiente energia da distruggere tutti i legami; spannometricamente l'energia necessaria per fondere Al ~ Fe (stessa famiglia, stesso tipo di legame).

La temperatura di fusione dell'**alluminio** (654°C) è molto minore di quella del **ferro** (1537°C).

Per la legge DeLongPetit sappiamo che si arriva a fusione quando si fornisce un'energia sufficiente a distruggere tutti i legami inter-atomici, raggiungendo una determinata temperatura. Quindi dobbiamo concentrare la nostra attenzione sull'energia necessaria per arrivare a fusione: sia l'alluminio sia il ferro sono caratterizzati dal legame metallico, quindi l'energia necessaria per rompere i legami è spannometricamente la stessa.

Nel materiale saldato si hanno tre zone

- Zona di fusione
- Zona termicamente alterata (parte più importante).
- Cuore

Se la saldatura è fatta bene e il componente si rompe in corso d'opera, esso si rompe nella ZTA. Esse sono le zone critiche perché riscaldandosi tendono a dilatarsi, ma avendo il cuore freddo inalterato a fianco che fornisce un'elevata resistenza a questo movimento, le ZTA vanno in compressione e il cuore in trazione. Nasceranno dunque delle tensioni interne, che aumenteranno nella fase di raffreddamento. Infatti, in questa fase, le ZTA cercano a contrarsi perché si raffreddano prima, ma il cuore caldo impedisce tale movimento. Di conseguenza, le ZTA vanno in trazione e il cuore in compressione. Inoltre, a basse temperature, il materiale è poco deformabile e se le azioni di trazione sono notevoli, il pezzo può andare incontro a rottura proprio nella ZTA, perché i materiali metallici sopportano molto male le sollecitazioni a trazione. Una modo per evitare rotture improvvise può essere quella di raffreddare più lentamente possibile. L'acqua è il mezzo peggiore per raffreddare i materiali metallici

Per saldature Al-Fe dalla parte del Fe si interpone una lamiera di Fe e dall'altra una di Alluminio (utilizzato in ambito navale, non in altri).

I pezzi da saldare non sono punti isolati nello spazio, bensì sono reali essi hanno una superficie, un cuore e occupano un volume ben determinato. Quindi, quando si riscalda un materiale, naturalmente si riscalda prima la superficie e solo successivamente il cuore: si crea un ΔT , cioè una differenza di temperatura, fra la superficie e il cuore. Se la superficie tende a dilatarsi perché riscaldata, il cuore la blocca, perché è ancora freddo: la superficie va in compressione e il cuore in trazione. Quando, invece, il cuore è diventato caldo e vorrebbe dilatarsi, trova l'opposizione della superficie: essa va in trazione e il cuore in compressione e vi è il rischio di rottura. Maggiori sono le dimensioni del pezzo, più lontano è il cuore dalla superficie e più evidenti sono i fenomeni visti in precedenza. In pezzi di dimensioni notevoli, la differenza di temperatura è elevata e può generare sollecitazioni talmente forti da rompere il materiale già nella fase di riscaldamento.

Un modo per evitare la rottura del pezzo è l'utilizzo di un riscaldamento graduale, cioè un aumento scalare della temperatura, per permettere l'uniformità fra la temperatura del cuore e la temperatura della superficie: si riscalda un pezzo fino ad una certa temperatura e si lascia uniformare il tutto, dopodiché si ricomincia a riscaldare e fino ad arrivare alla fusione della parte interessata, stabilendo dei pianerottoli per uniformare la temperatura.

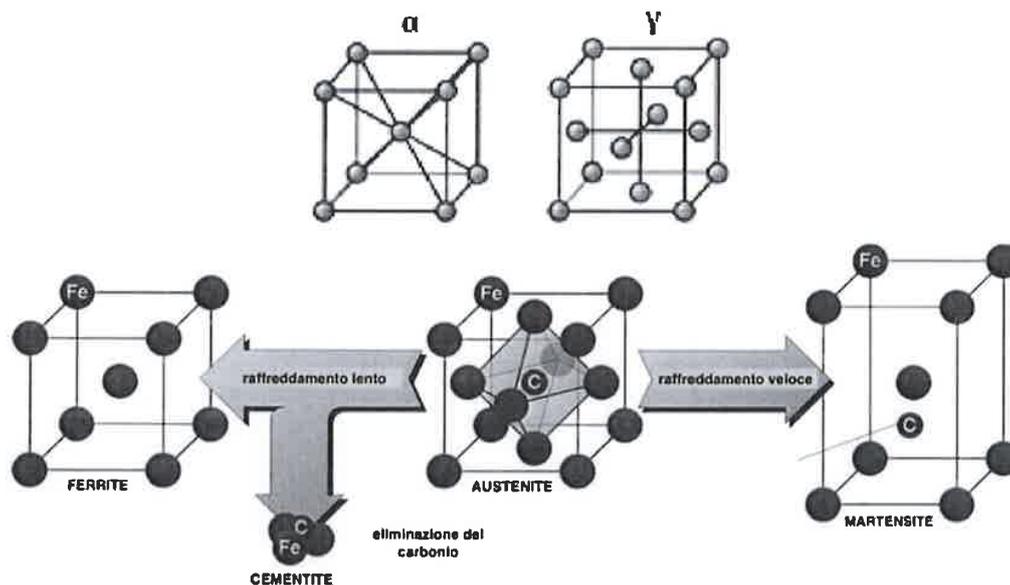
Un materiale metallico non si rompe mai per compressione, fatta eccezione per l'asta di punta, ma al massimo vi è il buckling. I materiali metallici, invece, si spaccano a causa della trazione.

Essendo la ZTA a contatto con il cuore freddo non alterato, esso ha un'elevata conducibilità termica, che rende il raffreddamento del materiale molto veloce e brusco. Nel caso degli acciai, si può andare incontro all'instabilità, cioè condizioni di non equilibrio non presenti nel diagramma di stato Fe-C. In altri termini, si formano delle fasi non previste dal diagramma Fe-C; in particolare, si forma la martensite.

Di solito si ha:

- CFC **austenite** (soluzione solida), γ , con solubilità in peso di carbonio del 2%
- CCC **ferrite** (soluzione solida), α , con solubilità in peso di carbonio dello 0,02%

La relazione che li lega è: CFC \rightarrow CCC + Fe₃C (cementite).



I processi diffusivi del carbonio necessitano, però, di tempo per svilupparsi. Se ciò non accade, come quando si raffredda velocemente il materiale, il carbonio non diffonde e si possono verificare due casi:

- 1) si ottiene una struttura CFC (austenite γ) a temperatura ambiente, cioè non è avvenuta nessuna trasformazione e il carbonio si trova nella cosiddetta lacuna ottaedrica;
- 2) si ottiene una struttura CCC con tenore di carbonio pari al 2%, cioè martensite, che essendo una struttura tetragonale è molto più fragile di quella cubica. Non si ha la formazione di carburi e il carbonio rimane intrappolato. Infatti, se il carbonio non esce, la cella si deforma e si allunga verso l'alto e verso il basso.

CARBONIO EQUIVALENTE

La capacità d'un acciaio di **contenere entro certi limiti i valori di durezza nella ZTA**, quando soggetta a **cicli termici** come quelli d'un procedimento di saldatura, è normalmente considerata un indice di saldabilità metallurgica. I valori di durezza delle microstrutture nella ZTA sono strettamente dipendenti dalla **composizione chimica dell'acciaio**, dalla **temprabilità** e dalla **velocità del raffreddamento del giunto**, subito dopo la saldatura. L'esperienza suggerisce che per evitare le cricche sotto cordone bisogna che la durezza della microstruttura non superi indicativamente i 350 HV.

La composizione chimica dell'acciaio è fondamentale, perché determina le trasformazioni microstrutturali che avvengono nella ZTA. Esiste quindi una correlazione tra la durezza della ZTA, il rischio di rotture e la composizione chimica dell'acciaio. Quest'ultima viene espressa con un indice definito **carbonio equivalente (CE)** tramite una formula matematica che varia a seconda del tipo di acciaio in questione.

Si definisce carbonio equivalente CE:

$$C.E. = \%C + \left(\% \frac{Mn}{\alpha}\right) + \left(\% \frac{Si}{\beta}\right) + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{\gamma}\right) + \left(\frac{\%Ni + \%Cu}{\delta}\right)$$

dove α , β , γ , δ sono dei coefficienti fissi che tengono conto della percentuale di martensite che viene creata dai singoli elementi, cioè quantificano l'influenza dell'elemento nella formazione di martensite. C invece è la percentuale di carbonio reale dell'acciaio. Nel nostro caso, ad esempio, $\alpha=6$, $\gamma=5$, $\delta=15$.

Affinché l'acciaio possa essere considerato saldabile, senza incorrere in fratture o rotture, il C.E. deve essere **minore o uguale a 0,4**.

La definizione del tenore di carbonio equivalente fa parte dei criteri di saldabilità, insieme alla definizione del tenore inclusionale di zolfo S e fosforo P. Quest'ultimo determina la purezza dell'acciaio.

Nel caso di acciai storici, bisogna di tenere in considerazione anche l'uniformità del materiale, effettuando delle prove di trazione e verificando la resistenza del materiale.

Per concludere, affinché una saldatura sia fatta in maniera corretta, possono essere prese diverse precauzioni:

- ridurre la differenza di temperatura tra ZTA e bulk, con un pre-riscaldamento del materiale in forno, se possibile (potrebbe non esserlo a causa delle dimensioni). Se bisogna saldare degli stampi, per eventuali modifiche, dato che vi sono alcune zone irrobustite (tallonatura), essi non si possono pre-riscaldare in forno, bensì si utilizza il riscaldamento con cannella o si opta per una saldatura a freddo;
- coprire la saldatura con materiale inerte (ad esempio con sabbia) che trattiene il calore e rallenta il raffreddamento;
- prendere le dovute precauzioni affinché si eviti o ci si accorga in tempo di eventuale sviluppo di idrogeno.

Nella **produzione di acciaio**, gli elementi che non mancano mai, oltre al carbonio C, sono il manganese e il silicio. Inoltre, a causa della composizione del coke, si trovano anche zolfo e fosforo, quindi oltre al carbonio equivalente, è necessario anche valutare il tenore di questi due elementi all'interno dell'acciaio per valutarne la purezza. Lo zolfo è sempre presente nel carbon fossile, da cui si ricava il metallo; affinché un acciaio sia buono, il tenore di zolfo non deve superare lo 0,01%. Infatti, lo zolfo ha un'elevata affinità con il ferro e possono formarsi solfuri di ferro, che assumono la forma di strisce allungate ben visibili.

Questa fase forma un eutettico bassofondente (900-950°C), che non permette di operare lavorazioni termiche dell'acciaio, poiché la temperatura eutettica è la più bassa a cui troviamo il liquido.

Inoltre, il solfuro interrompe la matrice metallica rendendo l'acciaio più fragile.

Il processo di **eliminazione dello zolfo**, detto **desolfurazione**, è un trattamento molto difficile e costoso e durante la vita dell'acciaio, il tenore di zolfo va sempre monitorato.

bisogna avere truciolo fragile

Esistono però degli acciai, detti **acciai automatici** o acciai a lavorabilità migliorata, in cui lo zolfo è aggiunto intenzionalmente. La loro caratteristica principale è quella di avere una facile lavorabilità alle macchine utensili ad asportazione del truciolo, cioè sono caratterizzati da una facile truciolabilità. Infatti, quando si lavora un materiale per asportazione di truciolo, il truciolo che si forma si incolla con l'utensile, impastandolo e impedendone il funzionamento. Quando sono necessarie tali lavorazioni, si preferisce un materiale che non produca truciolo o che ne formi uno tale da spezzarsi subito. Si ottiene ciò aggiungendo all'acciaio degli elementi infragilenti, come i solfuri, che creano nel materiale degli intagli a rottura e interrompono la matrice metallica, rendendo la struttura debole.

La composizione di questi acciai prevede lo **0,1% di zolfo**, ed è presente anche un alto tenore di **manganese** maggiore dell'**1-1,5%**, mentre negli acciai normali la percentuale di manganese è dello 0,3-0,4%, al massimo 0,6-0,7%. Infatti, manganese e zolfo sono molto affini e reagiscono fra loro, formando solfuri di manganese, e non solfuri di ferro, che hanno un eutettico a 1200-1250 °C. Grazie a questo accorgimento si possono operare trattamenti termici, conservando la caratteristica di fragilità. Quindi, il solfuro di manganese è necessario in qualsiasi tipo di acciaio che ha necessità di essere lavorato molto facilmente. Ad esempio, le viti delle sedie sono fatte di acciai automatici: esse sopportano uno sforzo praticamente nullo, quindi non importa che siano fragili, ma devono essere maschiate, cioè lavorate con una macchina utensile ad asportazione di truciolo.

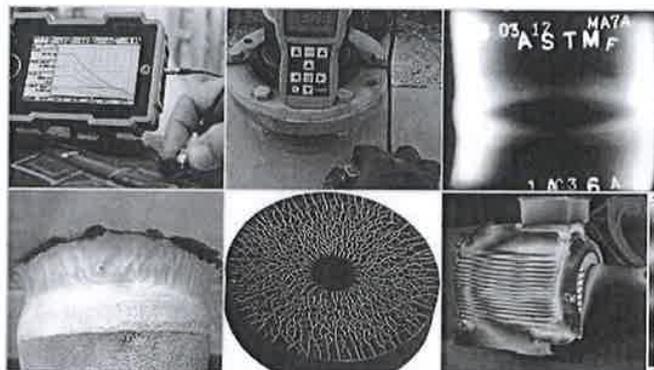
*eutettico
man + 900°C*

Quindi, si usa lo zolfo per migliorare la truciolabilità e il manganese per alzare la temperatura eutettica.

la presenza del solfuro è autolubrificante

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

I controlli non distruttivi (CND) sono un insieme di prove fisiche concepite allo scopo di indagare sulla eventuale presenza di difetti in un pezzo senza doverlo distruggerlo tutto o in parte, rendendolo inutilizzabile.



In linea di principio è bene sottolineare che i materiali metallici presentano sempre dei difetti superficiali non visibili ad occhio nudo od interni, e per conseguenza il problema è studiare ide i limiti di accettazione, diversi a seconda dei particolari costruttivi, dell'impiego e del tipo, dimensioni, ubicazione dei difetti.

I CND hanno lo scopo di individuare tutti i difetti di una certa importanza e di permettere un giudizio sull' accettabilità dei singoli pezzi, sulla possibilità di una eventuale riparazione o viceversa sul loro rifiuto.

Esiste un parallelismo fra corpo umano e materiali metallici: molte tipologie di analisi che vengono effettuate sul corpo umano possono essere fatte anche sui materiali metallici.

Soprattutto in ambito aerospaziale, il livello di sicurezza deve essere molto alto: si analizza il 100% dei componenti e non un certo numero di pezzi a campione, per cui i controlli sono tutti di tipo non distruttivo. Tali controlli da un lato sono utili ad attestare la qualità del prodotto, cioè assicurare che il componente sia privo di difetti, dall'altro aiutano a migliorare la qualità e la produzione: si possono trovare metodi più economici e sicuri per produrre un pezzo.

Le prove non distruttive (PND) consistono, per definizione, in quelle metodologie di indagine atte alla ricerca di discontinuità (failure) in un pezzo, senza distruggerlo o danneggiarlo, permettendone così il riutilizzo. Una failure rappresenta un malfunzionamento generale del componente, che non causa, per forza, la rottura. Tuttavia, il difetto non va sempre considerato come negativo, ma ha anche con un'accezione positiva, ad esempio nel caso di vacanze o dislocazioni, che sono fondamentali per i le proprietà dei materiali metallici.

Le PND hanno lo scopo di consentire l'emissione di giudizi di accettabilità dei singoli pezzi. La possibilità di estendere il controllo a tutti i componenti in una determinata costruzione consente di prevenire incidenti e disgrazie.

I metodi rontgenografici appartengono alla grande famiglia dei controlli non distruttivi (CND).

Discontinuità che insorgono durante la colata:

• **Discontinuità di cristallizzazione:** l'acciaio colato nella lingottiera o nella forma inizia la solidificazione dalle parti più esterne e con velocità di raffreddamento diverse tra le parti esterne e quelle interne, dando origine al dendritismo. Un dendrite è una forma morfologica di accrescimento di un grano in una struttura a "palizzata", con cristalli molto grandi che si allungano perpendicolarmente all'asse e che si dispongono dall'esterno verso l'interno, seguendo il gradiente di temperatura. Al centro del materiale, vi sono cristalli più regolari di forma poligonale. Si hanno, quindi, proprietà differenti in base alle zone. Le impurità si concentrano nel liquido e si spostano man mano che il materiale si raffredda: la superficie esterna sarà di acciaio puro, mentre il cuore che raffredda per ultimo sarà un concentrato di impurità, che vengono trascinate dal liquido. Ciò causa una disomogeneità della struttura del materiale. I dendriti sono in parte eliminabili con le successive lavorazioni a caldo, attraverso ad esempio la ricottura dei lingotti. A causa della non uniformità del raffreddamento, poiché si raffredda prima la superficie esterna e successivamente il cuore interno, compaiono tensioni residue all'interno del materiale. Se un dendrite si spezza durante la laminazione, si possono spaccare perfino i rulli di laminazione a causa del contraccolpo della rottura;

• **Discontinuità da segregazione;**

• **Cavità da ritiro:** sono dovute alla contrazione del materiale, che si ha nella fase solidificazione (6% per l'acciaio). Tale contrazione può dare origine a cavità nella parte che solidifica per ultima;

• **Inclusioni:** parti di refrattario che si staccano dalla siviera (il contenitore dell'acciaio liquido), dal canale di colata o da altre attrezzature. Durante la solidificazione tendono a concentrarsi nella parte alta del getto (materozza): con una corretta eliminazione di quest'ultima, è probabile una loro eliminazione;

• **Cricche:** si formano a causa di parametri di colata sbagliati o ad errori di procedimento o di geometria (forti cambiamenti di spessore nel getto);

• **Porosità:** è spesso causata da gas di varia natura che rimangono intrappolati nel getto ed è strettamente legata alla tecnologia di produzione utilizzata. Infatti, nei gas come l'idrogeno, la solubilità diminuisce al diminuire della temperatura, quindi rimangono intrappolati nel materiale, creando dei pori che lo indeboliscono.

Discontinuità che insorgono nei materiali durante l'esercizio:

sono essenzialmente dovute alla fatica, cioè quando si ha un'applicazione di un carico variabile nel tempo. Facendo dei cicli di carico si formano delle microcavità superficiali che portano a lungo andare alla rottura del pezzo. Il 90% delle rotture in esercizio è dovuta a fatica. La rottura da fatica dal punto di vista morfologico è divisa in tre zone:

- zona di innesco del fenomeno, solitamente in prossimità di un poro o di una cricca, cioè di zone soggette a sforzi maggiori;
- zona di propagazione, dove la cricca si propaga a causa dei cicli di carico e scarico;
- zona di cedimento, cioè la zona in cui si ha la cessione di scatto.

METODO RADIOGRAFICO

I raggi X (onde elettromagnetiche) sono prodotti entro un tubo radiogeno (tubo di Coolidge) per frenamento degli elettroni accelerati ad alta velocità contro un anticatodo di tungsteno; alla finestra di uscita essi sono costituiti da uno spettro di radiazione di radiazione distribuito su varie lunghezze d'onda con valore minimo pari a $\lambda_{\min} = 1,2395/kV$, dove al denominatore compare il valore della tensione acceleratrice degli elettroni, generalmente alta.

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

Presenta molti vantaggi:

- applicabilità alla maggior parte dei materiali (no ferromagnetici)
- possibilità di rilevamento di difetti a profondità maggiore rispetto ad altri metodi; per difetti più interni si utilizzano gli ultrasuoni;

ma anche svantaggi:

- i difetti bidimensionali come le cricche possono essere rilevati se il loro orientamento rispetto all'asse della radiazione è parallelo;
- l'utilizzo della radiazione ionizzante richiede il rispetto di severe legge con conseguente aumento dei costi;

L'uso dei raggi γ crea maggiori problemi a causa dell'impossibilità di spegnere la fonte: tali raggi derivano, infatti, dal decadimento radioattivo di particolari elementi ed è un processo naturale.

CORRENTI INDOTTE

Un altro metodo che sfrutta i principi magnetici ed elettrici sono le correnti indotte: avvolgendo il pezzo con un solenoide percorso da corrente, si genera un campo magnetico che induce delle correnti parassite nel pezzo. Se vi sono discontinuità, vi saranno delle alterazioni nella corrente indotta.

LIQUIDI PENETRANTI

Rappresenta una tecnica a metà tra un esame visivo e un esame strumentale, e si possono vedere solo difetti superficiali. Il particolare da analizzare è immerso in un liquido a bassa tensione superficiale, capace di penetrare entro eventuali discontinuità affioranti in superfici. Dopo un opportuno tempo di immersione il particolare viene estratto dal liquido e lasciato drenare. Mediante lavaggio viene asportato l'eccesso di penetrante e quindi si procede all'asciugatura in forno a circolazione di aria calda. Le discontinuità eventualmente presenti, a questo punto, contengono ancora del residuo di penetrante e se cosparse da un opportuno rilevatore, per adsorbimento si formano, sulla superficie del particolare, delle indicazioni più facilmente osservabili ad occhio nudo.



Si tratta di un metodo idoneo a rilevare solo discontinuità superficiali ed è applicabile a qualunque materiale, purché non poroso (non va bene per materiali sinterizzati).

Ha come vantaggi:

- applicabilità ad ogni tipo di materiale purché non poroso;
- semplice da eseguire;
- buona redditività;
- basso costo;

e come svantaggi:

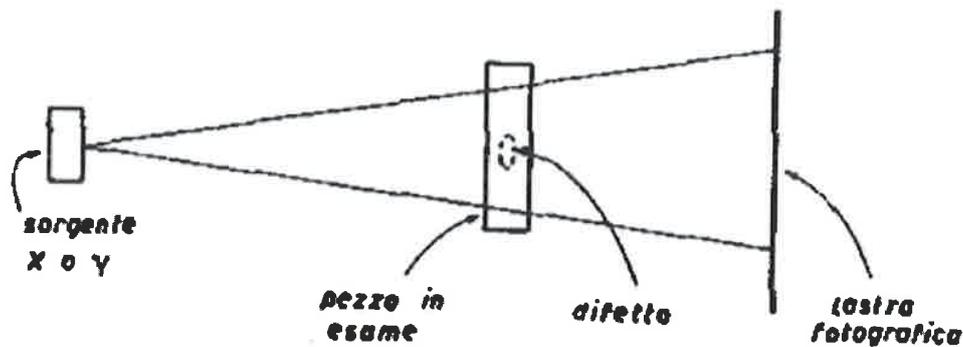
- non rileva discontinuità sotto pelle;
- solo in zone accessibili;
- nel caso di asportazione del liquido penetrante in eccesso con lavaggio in acqua, necessita il trattamento delle acque reflue.

ANALISI MICROSCOPICA

RAGGI X

Il potere penetrante delle radiazioni elettromagnetiche ad alta energia (x e γ) viene sfruttato da questa tecnica non distruttiva per indagare sulla compattezza dei materiali.

Le radiazioni, emesse da un'opportuna sorgente, colpiscono una lastra fotografica dopo aver attraversato il pezzo. Parte delle radiazioni in funzione del materiale e dello spessore viene assorbita dal pezzo e rimane inutilizzata, parte viene trasmessa, andando a colpire la lastra; vengono ovviamente annerite maggiormente le zone in cui lo spessore è minore, mentre rimangono più chiare le zone corrispondenti a spessori maggiori. Il coefficiente di assorbimento lineare è proporzionale alla densità, per cui se nel pezzo in esame esistono cavità contenenti aria o gas, tipo cricche, soffiature, porosità ecc oppure inclusioni di terra o scoria, le radiazioni vengono assorbite in minor misura dando sulla lastra l'immagine proiettata del difetto, più scura delle parti circostanti. In qualche raro caso invece, ad esempio per un'inclusione di tungsteno, si possono presentare indicazioni di difetti più chiare delle zone adiacenti.



Per la generazione dei raggi X si usano comunemente tubi a vuoto a catodo caldo, nei quali gli elettroni emessi da un filamento vengono accelerati da una differenza di potenziale dell'ordine di 50 kV - 500 kV e colpiscono un anticatodo di tungsteno.

Si può instaurare un parallelismo fra il corpo umano e i materiali metallici. Le analisi che si fanno al corpo umano esistono in modo equivalente per i materiali metallici: ad esempio, le analisi del sangue sono le analisi chimiche dei materiali oppure i raggi X delle lastre sono gli stessi usati per studiare la struttura interna di un materiale metallico. Tale analisi prende il nome di analisi roentgenografica.

L'energia di una radiazione è uguale alla costante di Planck per la frequenza della radiazione stessa:

$$E = e V = h * f = h * \frac{c}{\lambda}$$

La potenza dei raggi X dipende sia dal valore della corrente sia da quello della differenza di potenziale.

Si definisce **rumore di fondo** l'insieme di radiazione di energia non ben definita, cioè di diverse lunghezze d'onda, ma costituenti un unico pacchetto di energia. Infatti, il rumore di fondo è definito come una somma di oscillazioni irregolari, intermittenti o statisticamente casuali.

Come già detto, l'intensità del fascio di radiazioni dipende dall'intensità di corrente [mA]: il numero di elettroni liberati dal filamento è, infatti, proporzionale ad essa. Per variare la quantità di elettroni bisogna, quindi, variare la corrente: aumentarla significa aumentare la temperatura e conseguentemente, vi è un aumento della resistenza R del filamento per effetto Joule, quindi vi è un aumento della quantità di elettroni emessi. La qualità del fascio determina il potere penetrante della radiazione e dipende dall'energia degli elettroni emessi dal filamento, che a sua volta dipende dalla differenza di potenziale [kV]: maggiore è la differenza di potenziale, maggiore sarà l'energia degli elettroni.

I raggi X attraverso la materia in modo proporzionale alla loro energia: gli elettroni, infatti, possono interferire con la materia, quindi essere assorbiti durante il loro passaggio oppure essere semplicemente frenati. Il rallentamento dipende dal tipo di materiale e dello spessore della lastra: il piombo, ad esempio, è usato per schermare.

I raggi X hanno una lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza delle distanze interatomiche, cioè l'Angstrom: essi possono, quindi, interagire con i materiali solidi, mediante due fenomeni:

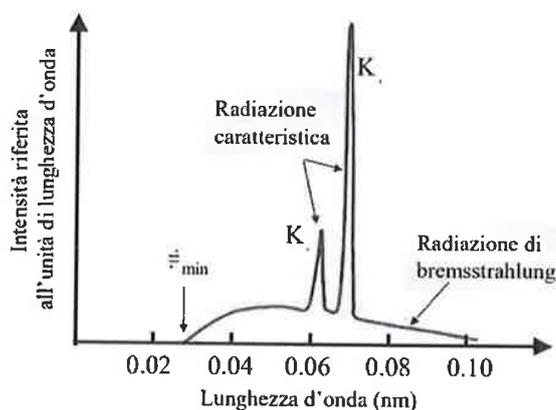
- 1) hanno la capacità di penetrare, entro certi limiti di spessore, i materiali solidi (potere penetrante dei raggi X). La luce, invece, non penetra la materia perché la sua lunghezza d'onda molto maggiori di 10-10 m.
- 2) Nelle applicazioni di tipo medico, si utilizzano radiazioni ad elevata penetrazione

La potenza dei raggi X è influenzata da due parametri: l'intensità di corrente, misurata in mA, determina la quantità di elettroni emessi, e la differenza di potenziale, misurata in kV, determina il potere penetrante. Per i materiali metallici, si utilizzano correnti di 20-30 mA e voltaggi di circa 40 kV, mentre per usi medici, le correnti hanno intensità simili alle precedenti (non possono essere troppo elevate perché si rischia di bruciare il filamento di tungsteno), ma i voltaggi sono di circa 100-150 kV.

I raggi X vengono generati nel cosiddetto tubo di Coolidge, che è costituito da una lampadina e da un anticatodo. Se vi è solido interposto tra i raggi X e l'ambiente esterno, esso assorbe i raggi X, totalmente o parzialmente, e una lastra posta dietro il corpo sarà impressionata in maniera differente a secondo che ci sia o meno materia. I punti dei materiali hanno diverse reazioni di fotosensibilizzazione.

SPETTRO DEI RAGGI X

Lo spettro dei raggi X può essere rappresentato come la **distribuzione dell'energia totale dei fotoni X prodotti in funzione della loro energia al variare della tensione di alimentazione di picco del tubo.**



SPETTRO/pattern: un modo di rendicontare l'esito di una radiazione

Lo spettro dei raggi X presenta una caratteristica curva, detta **Bremsstrahlung**, detta anche radiazione di frenamento o di fondo, definita come **la radiazione emessa da particelle cariche quando subiscono una decelerazione.**

Ciò avviene per esempio quando le particelle vengono scagliate contro un bersaglio metallico. Poiché gli elettroni sono molto più leggeri dei protoni

(massa a riposo circa duemila volte inferiore) il bremsstrahlung degli elettroni è la più comune; infatti l'intensità delle onde emesse è inversamente proporzionale al cubo della massa.

La curva non parte da zero: vi è infatti una lunghezza d'onda minima, λ_{\min} , che dipende dalla differenza di potenziale, e rappresenta l'energia cinetica degli elettroni: $E_c = hc/\lambda_{\min}$. Infatti, l'energia cinetica degli elettroni è definita come il prodotto fra la carica dell'elettrone e la differenza di potenziale a cui è sottoposto: $E_c = e \cdot \Delta V$.

La **radiazione di bremsstrahlung** è caratterizzata da una distribuzione continua di radiazione che diviene più intensa e si sposta verso le frequenze maggiori con l'aumentare dell'energia degli elettroni bombardanti. La frequenza massima della radiazione è legata all'energia cinetica degli elettroni da $E_c = hc/\lambda_{\max}$.

La radiazione di fondo corrisponde a un certo pacchetto di frequenze. Gli elettroni, oltre a cedere energia sotto forma di radiazioni e di calore, la cedono anche **agli elettroni dell'anticatodo, che acquistando un'energia, cioè un pacchetto energetico ben preciso, saltano ad un livello superiore (come afferma la teoria di Planck). Quando l'effetto finisce, gli elettroni dell'anticatodo avranno un'energia inferiore a quella richiesta dal livello in cui si trovano e sono costretti a tornare al livello iniziale, rilasciando, però, l'energia in eccesso sotto forma di radiazioni con una specifica lunghezza d'onda, che è rappresentata nel grafico come un picco.**

I picchi sono l'energia emessa dagli elettroni dell'anticatodo quando ritornano nelle condizioni iniziali.

Quindi, gli elettroni dell'anticatodo sono tornati al loro livello energetico iniziale, rilasciando pacchetti di energia ben precisa e proporzionale alla lunghezza d'onda λ . Si ottiene così un secondo tipo di raggi X.

La spettroscopia EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) o spettroscopia EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) è un metodo analitico strumentale che sfrutta l'emissione di raggi X generati da un fascio elettronico accelerato, incidente sul campione. La strumentazione è comunemente costituita da un microscopio elettronico a scansione. Schematicamente si può descrivere il principio di funzionamento nel seguente modo: un emettitore costituito da un filamento di tungsteno, che viene portato oltre i 1000 °C per riscaldamento elettrico, funge da sorgente di elettroni per effetto termoionico. Il fascio elettronico così generato viene accelerato da una differenza di potenziale di 0,3-30 KV e costretto a passare prima attraverso un collimatore elettromagnetico per essere deflesso, in modo da generare la scansione, e successivamente collimato verso il piatto contenente il campione in esame. Tutto ciò è svolto sotto vuoto, a circa 10⁻⁵ mbar, per aumentare il libero cammino medio degli elettroni ed evitare fenomeni di diffusioni a causa di interazioni aria-elettrone.

Il rivelatore, che è disposto in modo tale da ricevere il massimo livello di radiazione assorbibile, può essere del tipo a dispersione di lunghezza d'onda (WDS - Wavelength-dispersive X-ray spectroscopy) o a dispersione di energia (EDS - Energy-dispersive X-ray spectroscopy):

- **il rivelatore WDS** sfrutta le caratteristiche ondulatorie dei fotoni X. È costituito da un cristallo ricurvo, il "cerchio di Rowland", con un determinato passo d del reticolo cristallino, sul quale sono disposti il campione e il contatore di fotoni. Seguendo la legge di Bragg, solamente una determinata lunghezza d'onda sarà riflessa sul contatore, lunghezza d'onda che può essere variata ruotando il rivelatore. Quindi, tale metodo è utilizzato per contare il numero di raggi X di una determinata lunghezza d'onda diffratti da un cristallo. 22
- **il rivelatore EDS** sfrutta l'interazione energetica tra i raggi X e un opportuno materiale. Tale rivelatore è utilizzato per l'analisi chimica del campione in esame, che è principalmente influenzata dalla struttura atomica di quest'ultimo e dal suo spettro di emissione. È caratteristicamente rappresentato da un monocristallo di silicio drogato con litio, rivestito alle due estremità con uno strato conduttivo in oro, mantenuto in alto vuoto e alla temperatura di -192 °C con azoto liquido. Il cristallo di germanio ad elevata purezza rappresenta una moderna evoluzione più efficiente. Il principio di funzionamento sfrutta la produzione di corrente elettrica, che viene sensibilmente amplificata, generata per interazione tra fotoni e cristallo. Sono i rivelatori attualmente più utilizzati.

Questa analisi si effettua tramite un monocromatore, che è essenzialmente un filtro che permette ad una sola radiazione, cioè ad un solo colore, di uscire dal tubo di Coolidge, tipicamente quella corrispondente al primo picco, cioè $K\alpha$. Infatti, la luce può essere scomposta in diverse radiazioni caratterizzate ognuna da una specifica lunghezza d'onda e quindi, da specifici colori.

Monocromatore Filtro che blocca determinate radiazioni con una precisa lunghezza d'onda.

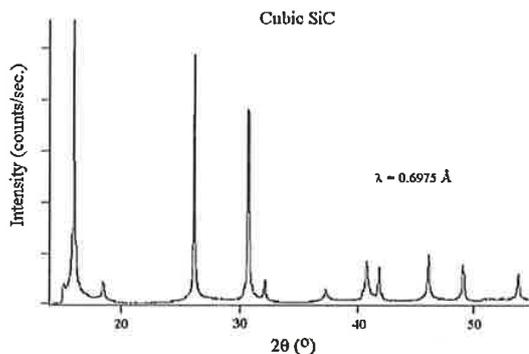
Dal monocromatore uscirà una radiazione con una lunghezza d'onda, dell'ordine di 10-10 m, e un'energia ben definite (microrontgenografia). Solo in tali condizioni è possibile il fenomeno della diffrazione. Infatti, la luce non può penetrare i materiali poiché la sua lunghezza d'onda è molto maggiore delle distanze interatomiche: $\lambda_{luce} \approx 10^{-9} \text{ m} > \lambda_{atomiche} \approx 10^{-10} \text{ m}$.

Lo strumento che comprende monocromatore ed altri strumenti utili all'analisi si chiama diffrattometro.

I raggi che incidono sul campione possono essere considerati paralleli perché la sorgente si può considerare posta ad una distanza praticamente infinita dal campione stesso: $10^{-2} \text{ m} \gg 10^{-10} \text{ m}$. Inoltre, per una semplificazione ingegneristica, assumiamo che i raggi X si comportino come raggi luminosi riflessi (in realtà, i raggi X che penetrano il materiale vengono riemessi, quindi riflessi, dal materiale stesso).

Vi è poi un contatore, cioè uno strumento che in grado di intercettare le radiazioni che vengono riemesse, ottenendo un segnale. Le radiazioni diffratte avranno in generale una fase differente e il segnale sarà massimo se sono in fase, mentre sarà minimo (o addirittura nullo) se si trovano in opposizione di fase.

Per ipotesi, assumiamo che le radiazioni che incidono il primo piano siano perpendicolari fra al piano, cioè l'angolo di incidenza sia molto grande, e siano tutte in fase, perché parallela fra loro.



Si ottiene, così, il reticolo di diffrazione, in cui si registreranno una serie di picchi, che indicano tutte le volte che è stata rispettata la legge di Bragg.

Cambiando le condizioni di funzionamento, cioè modificando la radiazione, il diagramma si sposterà: esso, quindi, dipende dalla lunghezza d'onda λ e dall'angolo di incidenza θ , ma non dalla distanza dai piani d poiché è fissa. Dunque, è necessario prima di leggere il grafico conoscere la radiazione che l'ha prodotto.

Alcuni sistemi non utilizzano una radiazione monocromatica, bensì una radiazione bianca, e non mettono il campione in rotazione, cioè l'angolo θ è fisso, ma varia la lunghezza d'onda λ .

Assumendo come strumento di analisi un monocromatore, λ è noto poiché la radiazione viene scelta, θ misurato dallo strumento, e quindi, è possibile ricavare la costante reticolare d . Quando si ottiene lo spettro di una sostanza, per leggere correttamente il grafico si effettua l'indicizzazione, cioè ogni picco viene attribuito il piano a cui corrisponde. Indicizzare uno spettro significa, quindi, individuare per ogni picco l'indice di Miller del piano che ha provocato quella determinata diffrazione.

Nel caso di una cella elementare cubica semplice si ha: $d = a/\sqrt{h^2+k^2+l^2}$. I parametri presenti nella formula rappresentano:

- a è la **SI DETERMINA** dimensione della cella;
- h, k ed l sono gli indici di Miller. Come si può vedere dal grafico sopra, un aumento di d è causa di una diminuzione del seno dell'angolo di incidenza: i primi picchi sono, dunque, quelli per valori di d più bassi.

Visto che a è costante ma di valore incognito, i d maggiori si hanno di indici minori, come per le facce del cubo, con indici del tipo $(1\ 0\ 0)$. Da qui si può ricavare, tramite la legge di Bragg, il valore di a . Questa operazione viene ripetuta anche per i picchi successivi: per il secondo, dato che d è maggiore, occorrerà prendere dei piani con indici di Miller più grandi, ad esempio il piano $(1\ 1\ 0)$. Ricavato nuovamente il d , ricalcolo il valore della a che deve essere uguale a quella calcolata in precedenza perchè il reticolo è cubico semplice. Andando avanti, si può analizzare il terzo picco prendendo il piano $(1\ 1\ 1)$ e si ricava di nuovo la a . L'operazione viene ripetuta fino a quando non si è sicuri che la a ottenuta sia giusta.

I raggi X sono fondamentali anche per conoscere le fasi di un materiale: con la diffrazione si può valutare se un acciaio è ferritico o austenitico, cioè dall'analisi ai raggi X si può vedere se la struttura è cubica a corpo centrato CCC o cubica a facce centrate CFC, perché i picchi avranno posizioni diverse. Infatti, l'atomo al centro nel CCC sarà in opposizione di fase rispetto alle altre radiazioni e annullare la radiazione precedente: il primo picco non sarà attribuibile al piano $(1\ 0\ 0)$ e quindi, si intuisce che si tratta di una cella di tipo CCC.

Attribuendo ad ogni picco il rispettivo piano, si riesce a risolvere lo spettro.

ANALISI MICROSCOPICA

In ambito medico, l'analisi microscopica è l'analisi istologica dei tessuti.

I **microscopi tradizionali** sono a trasmissione: il campione viene posto su un vetrino che viene illuminato dalla parte inferiore con un fascio luminoso che, attraversando il vetrino e il campione, trasmette e riflette l'immagine attraverso una serie di oculari. Quindi il raggio di luce deve passare nel campione da analizzare.

In ambito metallurgico si utilizzano **microscopi a trasmissione** per analizzare la superficie, in quanto essendo i materiali opachi, non fanno passare la luce. Si utilizza quindi un altro tipo di microscopio in metallurgia, il cui principio di funzionamento è quello di far funzionare il campione da specchio, cioè la luce viene riflessa dal campione stesso. Si sfrutta la proprietà dei materiali metallici di riflettere la luce, in opportune condizioni: si parla di **microscopio a riflessione** e a volte si aggiunge anche l'aggettivo inversa, in quanto il campione viene capovolto. Vi è una sorgente luminosa che invia un raggio di luce al campione e viene riflesso dalla superficie di quest'ultimo.

In natura difficilmente si trovano campioni pronti per essere osservati al microscopio, in quanto la superficie non è mai metallica, ma spesso è ricoperta da uno strato di ossido.

Le caratteristiche che deve avere una superficie per riflettere la luce sono:

- 1) essere costituita da un materiale riflettente, ad esempio un materiale metallico;
- 2) la superficie deve essere piana.

SCelta DEL CAMPIONE

Il primo problema che si pone è quello della scelta della parte di materiale da prelevare, che sarà il campione rappresentativo del reperto da analizzare al microscopio.

E' una scelta molto difficile da fare nella pratica in quanto maggiori sono le dimensioni del campione, maggiori sono le disomogeneità presenti nelle varie zone. Ad esempio, nel cuore del materiale si può avere metallo ricco di carbonio, fosforo e impurezze varie, mentre la superficie è costituita da metallo puro.

Le disomogeneità sono dovute a:

- differente composizione chimica tra superficie e cuore, a causa della solidificazione;
- differenti velocità di raffreddamento e riscaldamento, che determina la struttura del materiale;
- differente composizione cristallografica, a causa dei trattamenti termici;
- possibilità di ossidazione della superficie;
- apporto di materiale a seguito di trattamenti (cementazione con C, nitrurazione con N, ossidazione con O).

E' logico pensare che, in presenza di un oggetto di grandi dimensioni, si prelevi il campione nel luogo più accessibile e che non arrechi danni, cioè sulla superficie esterna, consapevoli che il campione che verrà analizzato non avrà le stesse caratteristiche del cuore del reperto. Tale campione, infatti, non rappresenta le proprietà dell'intero oggetto poiché non vi è una

un altro, causando la curvatura della superficie: ciò si traduce in un'impossibilità di mettere a fuoco il campione nella sua interezza;

4) potendo scrivere nel cilindro, si può identificare, etichettare e classificare il campione.

Nel caso in cui il materiale non possa essere riscaldato a temperature al di sopra dei ^{100°C} 120-130°C, come le leghe di alluminio serie 2000/7000/8000, poiché tale temperatura corrisponde alla loro temperatura di invecchiamento, non possono essere utilizzate resine termoindurenti. Esse vengono sostituite da resine bicomponenti, formate da due sostanze che messe a contatto polimerizzano a freddo, cioè a temperatura ambiente, inglobando il campione e non è necessario l'uso della pressa. Tuttavia, tali resine bicomponenti presentano una polimerizzazione inferiore a quella dei termoindurenti.

Esistono anche delle resine di materiale elettricamente conduttivo, che servono per preparare campioni da analizzare al microscopio elettronico. Infatti, se il materiale non fosse reso elettricamente conduttivo, si comporterebbe come un condensatore, scaricando le cariche. Oltre a tali resine, è possibile anche effettuare una metallizzazione, cioè depositare una patina di oro o grafite sulle superficie per rendere il materiale conduttivo oppure costruire un ponte di rame. La superficie viene preparata e resa piana attraverso carte abrasive, mettendo in movimento reciproco la carta e il campione. Un disco di carta abrasiva ruota e spiana la superficie del campione, che è fermo. Il materiale abrasivo della carta abrasiva è composto da carburo di silicio e le carte hanno varie granulometrie: di solito si inizia con carte grossolane, con pochi carburi (60).

Esse sono classificate tramite grid, che esprimono il numero di particelle nell'unità di superficie. Come liquido lubrificante si utilizza l'acqua.

Per abradere la superficie si parte dalla carta più grossolana e il disco gira fino a quando vengono rimosse le tracce della lavorazione precedente. Si vedranno, alla fine del primo step, solo archi di cerchio che ricoprono la superficie: viene, quindi, lavato il campione, ruotato di 90° e viene inserita una carta abrasiva più fine. L'operazione viene effettuata fino a quando tutti gli archi di cerchio della prima carta vengono eliminati e così via. Si passa da 60, a 120, a 240, a 320, a 500, fino a 1000 e si interrompe la lavorazione quando sono presenti sulla superficie solo finissimi archi di cerchio.

numero di carburi
nell'unità
di superficie

Finita la lucidatura si passa ai cosiddetti panni, cioè dischi di velluto i quali hanno lo scopo di rifinire e eliminare le striature rimanenti, utilizzando come materiale abrasivo una pasta diamantata di varia granulometria (7 micron, 3 micron, 1 micron e 1/4 di micron) e come liquido lubrificante l'alcol dietilico. Non si usa più l'acqua perché potrebbe ossidare la superficie e perché contiene delle impurità che potrebbero rigare e graffiare il campione.

mezzo lubrificante
Alcool

Si ottiene, così, un campione speculare, cioè uno specchio, pronto per essere analizzato al microscopio.

latte di allumina

Un'alternativa all'uso di carte abrasive e paste diamantate è l'utilizzo dell'allumina: attraverso una sospensione acquosa di allumina si ottiene un materiale molto lucidante. Tuttavia, si tratta di una sospensione molto acqua, lattiginosa, che rischia di sporcare tutto il laboratorio.



MICROSCOPIO ELETTRONICO

1000 X

Il principio di funzionamento del microscopio elettronico è basato sull'utilizzo di un fascio di elettroni. In questo caso, il campione non necessita di una superficie riflettente e piana, ma deve essere preparato attraverso una perfetta pulizia, in quanto viene messo sottovuoto. Se il campione fosse sporco, le impurità inquinerebbero il tubo dove vengono emessi gli elettroni.

Il campione viene posto in una soluzione e sottoposto ad ultrasuoni che, vibrando, puliscono il campione.

Inoltre, esso deve essere conduttivo, attraverso la metallizzazione con pellicola di oro o di grafite, o l'utilizzo di un ponticello elettronico in rame.

A questo punto il materiale da analizzare viene posto in un tubo, detto cannone, composto da due camere e in una delle due, viene fatto il vuoto. Il filamento presente all'interno del tubo si riscalda emettendo un fascio di elettroni che investono il campione: essi vengono riflessi e raccolti per mostrare la topografia del campione.

Esistono microscopi TEM (Transmission Electronic Microscope), utilizzati per ricerche scientifiche dove il campione deve essere così sottile da essere attraversato dagli elettroni. Se non si riesce ad assomigliarlo, si utilizza la replica, cioè si copia la superficie su un altro materiale attraverso una pellicola. Tali microscopi raggiungono ingrandimenti da 100000X in su e sono utilizzati per ricerche fini e costose.

Vi sono, poi, i microscopi SEM (Scanning Electronic Microscope), chiamato così perché gli elettroni passano per strati mandando l'immagine a video, cioè il campione viene scansato. Il microscopio ottico permette di visualizzare un campo 2D, a causa della spianatura della superficie.

Il microscopio elettronico ha il grande vantaggio di dare come risultato immagini tridimensionali, dunque non c'è bisogno della superficie speculare. Avendo a disposizione la profondità di campo, tale microscopio viene utilizzato nello studio delle superfici di frattura e nello studio della fatica.

Infatti, nel caso di una frattura, per utilizzare il microscopio ottico, bisognerebbe spianare la superficie, perdendo le informazioni necessarie all'analisi.

Inoltre, i microscopi elettronici sono dotati di microsonde, che permettono un'analisi chimica puntuale del materiale: se gli elettroni collidono con il materiale, esso fungerà da anticatodo e quindi da sorgente di raggi X. Ciò permette lo studio della composizione chimica del materiale attraverso un'analisi di fluorescenza: infatti, il reticolo è noto, cioè sono note le costanti reticolari, e con la legge di Bragg si può ricavare la lunghezza d'onda della radiazione emessa e di conseguenza l'energia.

Grazie a questa proprietà i microscopi elettronici sono utili per una topografia 3D della superficie e ancora di più per effettuare analisi chimiche.

Il punto più importante del microscopio elettronico NON è il grandissimo ingrandimento (x50000), ma la PROFONDITA' DI CAMPO (immagine 3-D)

Non necessita della superficie perfettamente piana e quindi vedo la morfologia reale della superficie, posso studiare la superficie di frattura.

PROPRIETA' MAGNETICHE

Le proprietà magnetiche riguardano solo una particolare classe di materiali metallici, caratterizzati dalla presenza di orbitali interni incompleti: essi prendono il nome di **metalli di transizione**. Solo i gas nobili hanno gli orbitali completi, ma di solito quelli incompleti sono quelli esterni, che permettono i legami chimici.

Il ferro ha numero atomico 26 e la seguente struttura elettronica: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$.

Si nota che l'orbitale d è incompleto. Gli elettroni di conduzione, cioè di valenza, sono quelli nell'orbitale 4s, che costituisce la banda di conduzione: essi possono lasciare il metallo e costituire la nube elettronica. **Le proprietà magnetiche risiedono nell'orbitale 3d: gli elettroni di tale orbitale sono fissi e rimangono legati all'atomo.**

Per distinguere i materiali in base alle loro proprietà magnetiche, bisogna analizzare il loro comportamento quando sono sottoposti all'azione di un campo magnetico esterno.

Possono verificarsi tre situazioni diverse.

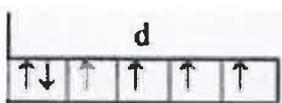
Mettiamo il materiale nel vuoto immerso in un campo magnetico H. Ci possono essere 3 reazioni.

1) il materiale si oppone al campo magnetico esterno: si ha una reazione negativa da parte del materiale e una rarefazione del campo magnetico—> **diamagnetismo**. Gli elettroni si muovono nell'atomo cercando di annullare le cariche per raggiungere la minima energia possibile. La presenza del campo magnetico esterno disturba il moto degli elettroni: essi cominceranno a ruotare in modo distorto, creando un campo magnetico interno che si oppone imposto dall'esterno;

(il campo magnetico disturba gli elettroni che generano a loro volta un campo magnetico indotto opposto a quello esterno (seguendo il principio di minima energia).)

2) il materiale rafforza notevolmente il campo magnetico esterno: si ha una reazione positiva da parte del materiale e un rafforzamento del campo magnetico—> **ferromagnetismo**;

3) il materiale rafforza debolmente il campo magnetico esterno—> **paramagnetismo**.



Nel caso del ferro, l'orbitale d potrebbe contenere 10 elettroni, ma ne contiene solo 6. Essi sono disposti in modo da occupare tutti gli orbitali, secondo il principio di minima energia (massima entropia) e il principio di esclusione di Pauli (regola di Huns): avremo un orbitale con due elettroni e 4 con un solo elettrone.

Avendo quattro elettroni spaiati, senza il rispettivo antagonista: essi ruotando creano un momento magnetico elementare residuo. Nella realtà, a causa dei fenomeni di schermaggio, si creano 2,6 momenti magnetici residui, invece che 4 per ogni singolo atomo.

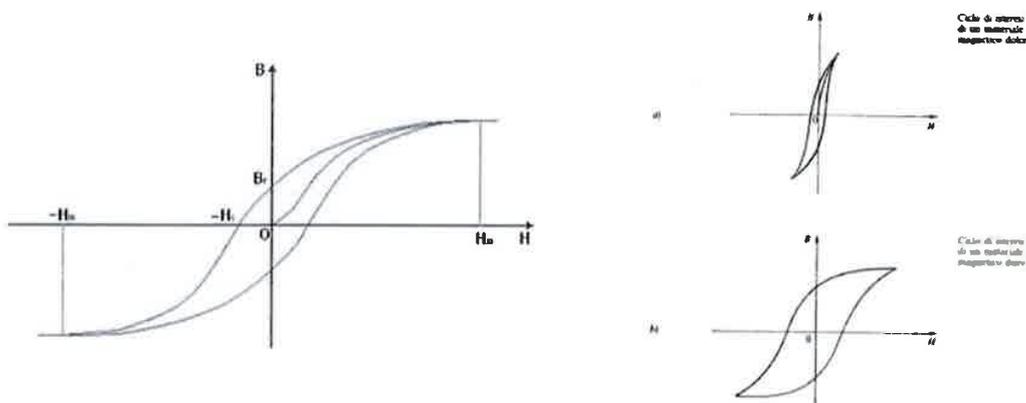
All'interno del ferro vi è una struttura ordinata in domini magnetici o domini di Weiss, cioè zone caratterizzate dall'iso-orientamento dei momenti magnetici residui di tutti gli atomi presenti nel singolo dominio. Tutti i domini hanno diversi orientamenti e quindi, esternamente il materiale non ha effetti magnetici, cioè non è una calamita.

- fenomeno dell'isteresi: una volta annullato il campo magnetico, il materiale rimane magnetizzato e per annullare il campo magnetico residuo bisognerà quindi applicare un campo magnetico in verso opposto.

I domini del materiale rimangono orientati: si è creata una calamita.

Questo comportamento è tipico dei materiali **magneticamente duri**, costituiti da cristalli fini, elementi leganti e un alto tenore di carbonio, che disturbano il movimento delle dislocazioni.

Le calamite sono molto fragili, in quanto le dislocazioni non hanno possibilità di muoversi.



Fino ad ora si è ragionato a temperatura ambiente, ma cosa succede variando la temperatura?

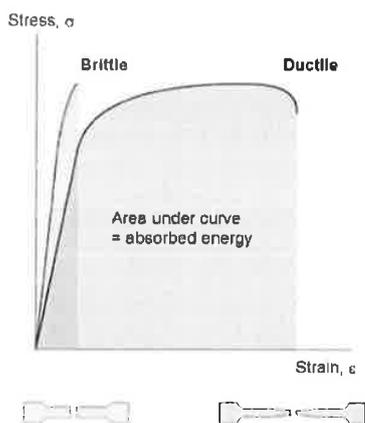
Se si raggiunge la temperatura di Curie, il materiale da ferromagnetico diventa paramagnetico. E' importante quindi che il materiale sia ferromagnetico a temperature industrialmente apprezzabili. Solo tre elementi hanno questa proprietà: il ferro (768°C), il cobalto (1115°C) e il nichel a (353°C). Quando un materiale viene scaldato fino al raggiungimento della temperatura di Curie, l'entropia diventa il fattore determinante: aumentano il disordine, i domini vengono distrutti e si annulla l'isoorientamento al loro interno, facendo diventare il materiale paramagnetico.

Un altro comportamento magnetico è quello del ferrimagnetismo, che è una disposizione nella quale i domini non sono tutti iso-orientati, ma la risultante dei momenti magnetici residui è comunque diversa da zero, in una certa direzione.

La magnetoscopia permette di verificare se il ferro è autentico o ferritico, anche solo utilizzando una calamita: essa non si attacca nel primo caso, mentre si attacca nel secondo.

Sottomarini: acciaio austenitico AISI 304 (paramagnetico)

I motori non possono essere fatti in acciaio austenitico perché non resisterebbero bene a fatica.



Un corpo è tanto più duttile quanto maggiore è la deformazione raggiunta prima della rottura.

Se i materiali fragili si rompono istantaneamente, cioè senza preavviso, e in modo del tutto ingestibile, i materiali metallici prima di rompersi si deformano plasticamente e quindi, danno il tempo di porre rimedio.

Inoltre, l'energia necessaria a portare a rottura un materiale, cioè l'area sottesa alla curva sforzo-deformazione fragile, nel caso di materiale fragile, ad esempio il vetro, è molto piccola, poiché la curva è molto prossima all'asse delle ordinate; un metallo invece prima di rompersi deve assorbire molta più energia.

A un certo punto, il materiale in campo plastico comincerà ad assottigliarsi (fenomeno della strizione) fino a rompersi.

Ciò vuol dire che i materiali metallici permettono di lavorare in perfetta sicurezza in esercizio: essi hanno carichi di snervamento σ_Y e carichi di rottura σ_R elevati, cioè sono materiali resistenti, che permettono un alleggerimento della struttura perché non vi è la necessità di sovrapporre molti strati. I materiali metallici hanno elevate caratteristiche meccaniche, che permettono, quindi, di ridurre il peso della struttura.

In caso di sollecitazione incidente, l'energia viene utilizzata per la deformazione del materiale e non per la creazione di nuove superfici, cioè non per la rottura. Affinché l'energia assorbita sia elevata, il tratto plastico deve essere molto esteso. Ad esempio, nel campo automobilistico, per la palle delle automobili si usano materiali in fibra di carbonio, cioè materiali compositi, mentre per l'ossatura si usano materiali metallici. Tuttavia, emerge il problema della riciclabilità, cioè di ricaricare interamente il componente, e ciò non è possibile con i materiali polimerici e compositi. I sedili e la loro imbottitura, gli pneumatici non sono riciclabili; i materiali metallici e il vetro, invece, sono gli unici materiali totalmente riciclabili. Ora si sta diffondendo il concetto di re-impiego, cioè si utilizzano i materiali, ad esempio la carrozzeria, per fare altri accessori (declassamento meccanico).

I materiali metallici sono sicuri, ma anch'essi arrivano alla rottura. Tuttavia, ciò avviene dopo molti "campanelli di allarme": la deformazione è visibile e per aumentarla, è necessario aumentare il carico. La velocità di deformazione è proporzionale alla velocità di aumento del carico: se il carico aumenta lentamente, la deformazione avverrà lentamente di conseguenza. Ciò permette di operare in sicurezza con i materiali metallici

Perché le dislocazioni sono possibili solo nei materiali metallici?

Chiaramente il motivo risiede nella natura del legame metallico.

Nei legami ionici, come ad esempio il gesso (solfato di calcio biidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o il sale, che ha una struttura cubica semplice, non c'è movimento dislocativo perché esso porterebbe ioni dello stesso segno a contatto, innescando immediatamente forze repulsive, che causano la rottura del materiale (il materiale si spacca).

Nel legame metallico, invece, i moti dislocativi sono permessi grazie alla presenza della nuvola elettronica: infatti, spostare uno ione non produce alcuna conseguenza.

Si definisce vettore di Burgers, b , la distanza reticolare a , nel caso in cui le dislocazioni siano reticolare.

Se la dislocazione è di reticolo il vettore di Burgers è pari alla distanza reticolare.

Se invece il vettore di Burgers non è uguale alla distanza reticolare si chiamano dislocazioni non di reticolo. Tipico del reticolo CFC ed esagonale compatto.

Le dislocazioni si muovono lungo direzioni che rendono il vettore di Burgers più piccolo possibile, poiché l'energia necessaria da fornire affinché una dislocazione si muova è proporzionale a b^2 .

Tali piani sono quelli in cui gli atomi sono più vicini, quindi le distanze interatomiche sono minori: si tratta dei piani a maggiore densità elettronica.

[Nei reticoli CFC e EC, il vettore di Burgers b è diverso dalla distanza reticolare a e si parla di dislocazioni parziali.]

Nel caso di una **cella cubica a facce centrate CFC**, i piani con gli atomi più vicini sono quelli diagonali $(1\ 1\ 1)$, cioè il piano passante per i tre vertici, nelle tre direzioni $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$. Quindi, per ogni cella, di piani $(1\ 1\ 1)$ ve ne sono quattro, per un totale di 12 direzioni distribuite uniformemente nello spazio, lungo le quali le dislocazioni possono muoversi liberamente.

Quindi, il reticolo CFC è quello più sicuro poiché la deformazione avviene in ogni caso. Ne è un esempio l'austenite, che è molto costosa.

Nel caso di una **cella cubica a corpo centrato CCC**, esiste una direzione di maggiore impaccamento, cioè la direzione del cubo $\langle 1\ 1\ 1 \rangle$, che individua tutti i piani che la contengono (esempio $(1\ 1\ 0)$).

Tutti i piani che contengono la direzione $[1\ 1\ 1]$ sono piani che possono fungere da piani di scorrimento.

I sistemi di scorrimento in questo caso però si possono attivare o meno in base alla temperatura.

Per temperature maggiori della temperatura ambiente, tutti i sistemi sono attivi e si ha un materiale duttile, mentre al di sotto della temperatura ambiente il materiale diventa fragile.

Ad alte temperature quasi tutte le direzioni di scorrimento sono possibili, mentre a T basse quasi tutti i piani sono bloccati.

TRATTO ELASTO-PLASTICO

Definiamo il carico nominale:

$$\sigma_n = \frac{P}{A_0}$$

Definiamo l'allungamento:

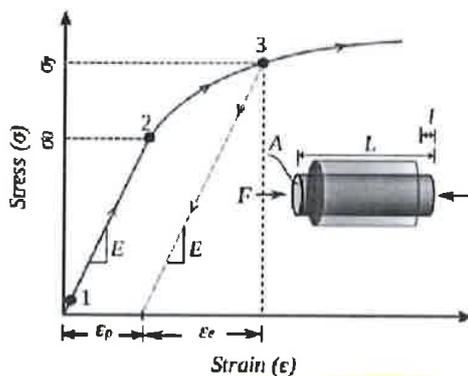
$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L_0}$$

Quando si supera la tensione di snervamento $\sigma_Y = \sigma_{0.2}$ inizia l'incrudimento.

Il tratto seguente viene impropriamente chiamato tratto plastico, quando dovrebbe essere indicato esattamente come tratto elasto-plastico.

Quando si scarica il materiale, cioè eliminando il carico $\sigma_{0.2}$, esso presenta una deformazione plastica residua dello 0,2%.

La retta passante per l'origine e quella passante per la tensione di snervamento in realtà non sono parallele, in quanto il modulo di Young diminuisce all'aumentare della deformazione, poiché si introducono nuove deformazioni che diminuiscono la rigidezza del materiale (è come se si introducessero dei buchi nel materiale). } ???



Si ha un effetto di **springback** o ritorno elastico: vi è un ritorno elastico, in quanto la deformazione residua è quella dello 0,2%, anche per il carico applicato si avrebbe valori di deformazioni più elevate, dando così un comportamento elasto-plastico. Questo comportamento è non voluto, perché l'energia elastica viene fornita, quindi rappresenta un costo, e viene restituita in modo talvolta dannoso. Tale effetto deve essere minimizzare, ad esempio, per la produzione degli stampi.

Bisogna, quindi, avere carichi di snervamento bassi, in quanto così si arriva nel tratto plastico con meno sforzo, che si traduce in potenze minori nelle presse e minor ritorno elastico a parità di deformazione.

Negli **acciai da profondo stampaggio**, utilizzati per la realizzazione delle carrozzerie, il carico di snervamento è basso. Inoltre, in essi vi sono pochi elementi leganti (tenore di carbonio varia tra lo 0,02% allo 0,04%; bassissimi tenori di nichel Ni, silicio Si e magnesio Mg) ed il grano non deve essere fine, ma grosso (comunque non oltre il 20 micron), perché quello fine blocca le dislocazioni.

Il grano deve essere grosso anche per **leghe per alta temperatura**, cioè per le superleghe, in cui si verifica il fenomeno del creep, dove le deformazioni plastiche sono causate non solo dal moto dislocativo, ma anche dallo scorrimento tra grani: quindi avere grani grossi minimizza questo effetto; addirittura si hanno dei precipitati a bordo grano per evitare lo scorrimento stesso tra i grani.

Un discorso analogo può essere svolto per le deformazioni: nelle prove si misura una lunghezza iniziale L_0 .

Quando il materiale comincia a deformarsi si ha una deformazione pari a $(L_1 - L_0)/L_0$.

Nella deformazione successiva si partirà da una lunghezza iniziale L_1 e si avrà $(L_2 - L_1)/L_1$.

La deformazione reale si può quindi scrivere come:

$$\varepsilon = \frac{\Sigma(L_{n+1} - L_n)}{L_n}$$

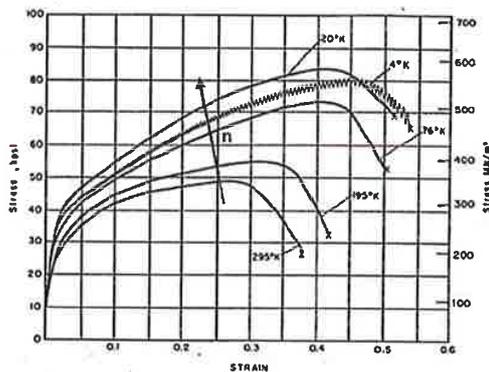
Passando all'integrale tra L_0 ed L si ottiene

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(\varepsilon + 1)$$

Nel primo tratto del diagramma parlare di valori nominali o reali non ha grande differenza perché la deformazione vale pochissimo.

Pertanto in campo elastico vale la legge di Hooke: $\sigma_n = e E$

Il problema è quando entro in campo plastico. Qui le deformazioni non sono più trascurabili e quindi devo usare le σ_{reali} e le deformazioni reali.



Non avremo più un andamento lineare. La legge più semplice che descrive l'andamento in campo plastico è:

$$\sigma_{reale} = k e^n$$

dove n è il coefficiente di incrudimento.

All'aumentare di n , aumenta la pendenza della curva.

Per $n = 0$ avremo il caso di materiale perfettamente plastico.

Per $n = 1$ avremo un materiale perfettamente elastico.

Quindi $0 < n < 1$

Nel caso reale, vi è una diminuzione del carico perché si continua a considerare la sezione iniziale A_0 , mentre nella realtà non vi è un massimo apparente, ma si hanno curve monotone crescenti, in cui non è evidente il carico massimo.

Si cerca di avere un materiale con il coefficiente di incrudimento più alto possibile, perché all'aumentare di n aumenta anche la differenza di carico permessa nel tratto plastico, il che si traduce in una maggiore facilità di lavorazione.

Se vogliamo facilitare le operazioni di stampaggio dobbiamo avere un coefficiente di incrudimento il più alto possibile. Infatti per n bassi la differenza di carico permessa per lavorare in campo plastico è bassissima ed il materiale si rompe con grande facilità.

I grani grossi facilitano ad avere n il più alto possibile. Acciai austenitici = n alti.

Acciaio di profondo stampaggio (feP01, 2, 3, 4, ,5, 6, 7 -> freddi, 8, 9, 14 -> caldi)

Laminati a freddo (spessore minore) / laminati a caldo (spessore maggiore):

Il carico di snervamento deve essere più basso possibile, minore sarà l'energia di tipo elastico che devo fornire minore effetto springback.

Inoltre, in un materiale da profondo stampaggio dovremo provare ad avere il più alto valore possibile di rigidità (modulo di Young E) per minimizzare l'effetto spring-back

Ricapitolando, per avere un materiale facilmente stampabile, bisogna avere basse tensioni di snervamento, alti coefficienti di incrudimento, elevati moduli elastici (per evitare il ritorno elastico) ed elevato coefficiente di **anisotropia R**.

L'**anisotropia** è una misura di quanto le proprietà sono le stesse in ogni punto del materiale.

Supponiamo di avere una lamiera da profondo stampaggio. Se deformato troppo una lamiera molto fine (~1mm) posso incorrere nel fenomeno di perdita della sezione resistente che può portare effetti indesiderati come il fenomeno dello stone chipping dei serbatoi delle automobili (pietruzze scagliate dagli pneumatici dell'autovettura perforavano il serbatoio costruito da una sottile lamiera metallica, posto in fondo all'auto).

In queste lamiere vogliamo avere un coefficiente di anisotropia molto alto.

Il senso del coefficiente di anisotropia è il rapporto tra deformazione nel senso della larghezza e deformazione nel senso dello spessore

Vogliamo che la lamiera si deformi molto nel senso della larghezza e poco nel senso dello spessore.

Si definisce coefficiente di anisotropia R la quantità:

$$R = \frac{(D_{longitudinale} + D_{trasversale} + 2D_{45^\circ})}{4} = \frac{(L + T + 2 \cdot D_{45^\circ})}{4}$$

D indica la deformazione: L è la deformazione longitudinale e T è la deformazione trasversale.

È auspicabile che R sia maggiore di 1 affinché la lamiera si restringa senza assottigliarsi.

Un materiale deformato solitamente si allunga nella direzione di applicazione del carico e si assottiglia nelle altre due direzioni. Nel caso di lamiere sottili (1 mm, 0.8 mm, 0.6 mm) è pericoloso se esse si assottigliano troppo nel senso dello spessore, poiché diminuisce la resistenza della struttura (fenomeno dello stone chipping).

E' preferibile avere R molto elevato, cioè un manufatto che si allunga, ma non si assottiglia. Per sfavorire l'assottigliamento bisogna inibire la crescita dei piani dove si muovono le dislocazioni nel senso dello spessore.

PRODUZIONE DELL'ACCIAIO

CENNI DI TERMODINAMICA

La termodinamica è la scienza che studia le trasformazioni dell'energia, che è la capacità di un sistema di compiere del lavoro da parte di un sistema.

Esistono varie forme di energia: termica, chimica (combustione), meccanica, nucleare, elettrica, magnetica, gravitazionale, e così via.

Tutte queste forme di energia possono essere racchiuse, dal punto di vista termodinamico, in un unico termine: l'**entalpia**

$$H = p \Delta v.$$

L'energia entalpica era l'unica forma di energia termodinamica usata fino ai primi anni del 1800.

L'espressione compiuta dal punto di vista energetico di un sistema deve tenere conto, oltre l'entalpia, di un secondo termine, l'**entropia**

$$S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Essa è una misura del disordine di un sistema, che si crea quando sovrapponiamo simultaneamente più sistemi ordinati.

Quindi, il disordine, in ambito termodinamico, ha un'accezione positiva, così come la presenza di difetti, quali vacanze e dislocazioni, che permettono la deformazione plastica dei materiali metallici.

Un sistema disordinato contiene in sé una pluralità di sistemi ordinati ed ha più possibilità di evolvere rispetto ad uno ordinato, in quanto contiene più sistemi possibili.

Dunque, dal punto di vista energetico, visto che il principio che regola tutti i sistemi è quello di raggiungere spontaneamente il livello minimo di energia, avere un'alta entropia significa favorire il raggiungimento di esso poiché vi è la possibilità di intraprendere diverse strade.

Si definisce **energia libera di Gibbs** G di un sistema una quantità:

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

e contraddistingue dal punto di vista termodinamico un sistema.

Infatti, da un lato vi è H , che tiene conto dell'energia potenziale e cinetica gravitazionale ed è una misura dell'energia propria del sistema, dall'altro vi è S , che è una misura dei sistemi ordinati compresenti nel sistema disordinato ed è una misura della facilità di evoluzione del sistema.

Tale forma di energia fu "scoperta" da Gibbs e "pubblicizzata" nel mondo da Helmholtz.

Quindi, l'effetto dell'entropia è modulato dalla temperatura, la quale smorza o amplifica il suo effetto: per minimizzare l'energia libera di Gibbs, l'ideale sarebbe avere basse entalpie ed elevate entropie, quindi un sistema molto disordinato.

VACANZE

Le vacanze sono difetti di reticolo puntuali e sono caratterizzate dalla mancanza di un atomo in una posizione reticolare dove, invece, dovrebbe essere presente.

Le vacanze sono fondamentali perché facilitano il moto dislocati ed inoltre, hanno la proprietà di essere termodinamicamente prevedibili.

Le vacanze possono essere create dal passaggio di atomi dall'interno del cristallo verso la superficie. Possono muoversi dentro il cristallo in conseguenza del salto di un atomo da una posizione intorno alla vacanza, entro la vacanza stessa.

Per creare una vacanza serve una certa quantità di energia, necessaria a:

1. vincere le forze esercitate dagli atomi sull'atomo che si muove;
2. compiere il movimento stesso. Il lavoro, quindi l'energia, è fornito dalle vibrazioni termiche del reticolo cristallino, le quali dipendono dalla temperatura.

Perché si formano le vacanze?

Gli atomi tendono a migrare dall'interno verso la superficie questo crea vacanze nell'interno del solido.

Per creare una vacanza occorre rompere i legami e muovere l'atomo.

La Temperatura fornisce l'energia necessaria (vibrazioni termiche) a rompere i legami e a trasportare gli atomi verso la superficie

L'entropia è una funzione probabilistica ed una misura delle possibili configurazioni ordinate di un sistema, le quali convergono verso il minimo di energia.

Le possibilità di evoluzione di un sistema sono, in genere:

- miscela, un insieme di atomi con un certo numero di vacanze;
- reticolo perfetto con vuoti

La presenza di vacanze incrementa l'entropia della miscela a causa di due contributi: l'entropia intrinseca e l'entropia di miscela, definita come

$$S_m = -(n_o - n_v) K \left[\left(\frac{n_v}{n_o + n_v} \right) \cdot \ln \left(\frac{n_v}{n_o + n_v} \right) + \left(\frac{n_o}{n_o + n_v} \right) \cdot \ln \left(\frac{n_o}{n_o + n_v} \right) \right]$$

dove k è la costante di Boltzmann, n_o è il numero di atomi e n_v quello di vacanze.

Quindi, possiamo modificare l'espressione dell'energia libera di Gibbs per le vacanze:

$$G_m = n_v W_v - T \cdot \Delta S_m$$

con W_v lavoro necessario per formare una vacanza e ΔS_m è l'entropia della miscela che dà un'idea di quale sistema è più probabile che si verifichi.

Quindi, il numero delle vacanze cercherà di raggiungere per ogni temperatura un valore corrispondente a un minimo di G_v .